



# Jäljitettävyyttä ja vastuullisuutta palvelevan elinkaaripohjaisen ympäristötiedon hallintamallin määrittely ja käytön kehittäminen elintarvikeketjussa

*Hierarchical network-LCA model for managing environmental information and promote traceability and CRS in food system (HierarchyNet)*



Yrjö Virtanen, Pasi Suomi, Jouni Nousiainen, Tapio Salo ja Marja-Liisa Vieraankivi Maa- ja elintarviketalouden tutkimuskeskus (MTT); Katri Rankinen ja Petri Ekholm Suomen Ympäristökeskus (SYKE)

**Jäljitettävyyttä ja vastuullisuutta palvelevan elinkaaripohjaisen  
ympäristötiedon hallintamallin määrittely ja käytön kehittäminen  
elintarvikeketjussa**

*Hierarchical network-LCA model for managing environmental information and promote  
traceability and CSR in food system (**HierarchyNet**)*

# **LAATUKETJUHANKKEEN LOPPURAPORTTI**

Maaliskuu 2014

Yrjö Virtanen, Pasi Suomi, Jouni Nousiainen, Tapio Salo ja Marja-Liisa Vieraankivi Maa- ja  
elintarviketalouden tutkimuskeskus (MTT); Katri Rankinen ja Petri Ekholm Suomen  
Ympäristökeskus (SYKE)

# Jäljitettävyyttä ja vastuullisuutta palvelevan elinkaaripohjaisen ympäristötiedon hallintamallin määrittely ja käytön kehittäminen elintarvikeketjussa

*Hierarchical network-LCA model for managing environmental information and promote traceability and CSR in food system (HierarchyNet)*

## Sisällysluettelo

1.	Johdanto .....	5
2.	Hankkeen tavoitteet .....	5
3.	Hankeosapuolet ja yhteistyö .....	6
4.	Hankkeen vaiheet .....	6
4.1.	Kasvintuotannon prosessien panosten ja tuotosten seurantaan eri tasoilla käytettävien mallien tekninen kehittäminen ja pilotointi .....	6
4.1.1.	Mallien tavoitteet ja systeemien rajaukset .....	7
4.1.2.	Perustietojen keruujärjestelmä .....	8
	Cropinfra-tutkimus- ja kehitysalusta .....	8
	Perustietojen keruujärjestelmän periaate .....	9
4.1.3.	Tehtävämallit .....	10
	Metatiedot .....	11
	IO –tiedot .....	11
4.1.4.	Lohkomallit .....	14
	Tehtäväinstansseilta periytyvät panos- ja tuotosvirrat .....	15
	Kasvulohkolta periytyvät päästöt ilmaan ja veteen .....	15
	• NH <sub>3</sub> -ja NO- päästöt ilmaan .....	16
	• N <sub>2</sub> O päästöt ilmaan .....	20
	• CO <sub>2</sub> -päästöt ilmaan .....	23
	• Ravinnehuuhtoumat .....	25
4.1.5.	Tuotantolinjamallit .....	25
	Viljely- ja tehtäväinstansseilta periytyvät panos- ja tuotosvirrat .....	26
4.1.6.	Tuotteiden elinkaarimallit .....	26
	Tuotantolinjainstansseilta ja ulkopuolisilta panosketjuilta periytyvät panos- ja tuotosvirrat .....	27
4.2.	Lohkokohtaisten ravinnehuuhtoumamallien kehittäminen ja pilotointi .....	28
4.3.	Mitattuihin tietoihin nojautuvan karjamallin kehittäminen ja pilotointi .....	28
4.3.1.	Mallien tavoitteet ja systeemien rajaukset .....	28
4.3.2.	Perustoimintojen mallit .....	29
	Entalpian käyttö .....	30
	• Sikiön kehittyminen .....	30
	• Kasvu .....	31
	• Painon vaihtelu .....	33
	• Maidon muodostuminen .....	34
	• Ylläpito .....	35
	Typen käyttö .....	35
	• Sikiön kehittyminen .....	36
	• Kasvu .....	36
	• Painon vaihtelu .....	36
	• Maidon muodostuminen .....	36
	• Ylläpito .....	37

Fosforin käyttö.....	37
• Sikiön kehittyminen .....	37
• Kasvu .....	37
• Painon vaihtelu .....	38
• Maidon muodostuminen .....	38
• Ylläpito.....	38
4.3.3. Energian ja ravinteiden hankinta.....	38
• Entalpiatase .....	39
• Kuiva-ainevirta sisään.....	39
• CH <sub>4</sub> -päästöt ilmaan .....	40
• Typpitase .....	40
• Fosforitase .....	41
• Vesitase .....	42
4.3.4. Eläimen elinkaarimalli.....	43
Elinkaaren relaatiomalli .....	43
4.3.5. Elinkaaren malli syntymästä eteenpäin .....	45
• Perustoimintojen ainevirrat .....	45
• Ainevirtojen kertymät .....	45
• Päätuotteiden ympäristötietojen tuottaminen .....	46
4.3.6. Sikiövaiheen malli.....	48
4.3.7. Koko elinkaaren malli .....	49
4.3.8. Karjan elinkaarimalli .....	49
Eläinten elinkaarista periytyvät ainevirrat .....	49
Hyödynnettyjen päätuotteiden ainevirtojen ominaismäärät .....	50
• Kasvu .....	51
• Maito .....	52
4.3.9. Mallin verifiointi .....	53
5. Tulokset ja niiden arviointi .....	54
Kasvintuotannon mallien kehittäminen .....	54
• Tehtävien yksikkökulutuksen mallit .....	61
Huuhtoumamallien kehittäminen .....	67
Karjamallin kehittäminen.....	68
6. Johtopäätökset .....	74
7. Loppuraportin tiivistelmä .....	76
Viitteet .....	78

## **1. Johdanto**

MMM:n rahoittama Ketjuvastuu–hanke [1] tuotti vuoden 2009 lopulla mallin koko elintarvikesektorin ympäristöraportointia varten. Tällä raportoinnilla saavutetaan kuitenkin tehokas ohjausvaikutus vasta sitten, kun kansantalouden tason mallista pystytään muodostamaan ajantasaiset yhteydet yritys- ja prosessitasoille, joihin ohjaustoimien tulisi kohdistua eri osa-alueiden ja kokonaisuuden ekotehokkuuden parantamiseksi. Tällöin pystytään arvioimaan elintarvikeketjun ekotehokkuuden muutoksia tiheimmällä tahdilla ja edullisemmin kuin mihin pystytään uusimalla koko ketjumalli, mikä on paljon resursseja vaativa toimenpide.

Ketjuvastuu – hankkeen tulokset osoittivat, että ympäristövastuullisuuden kannalta katsottuna elintarvikesektorin kaksi kriittisintä toimijaryhmää ovat raaka-ainetuottajat ja kuluttajat. Näissä ryhmissä tehtävät päätökset muodostavat elintarvikeketjun ympäristövastuullisuuden ja jäljitettävyyden perustan. Kuluttajat tarvitsevat valintapäätöksiensä tueksi tietoa tuotteiden konkreettisista ympäristövaikutuksista ja alkuperästä. Raaka-ainetuottajat taas ovat avainasemassa tietojen hankinnassa, sillä heidän toimialansa on useiden ympäristövaikutusten suurin aiheuttaja elintarvikeketjussa, kuten Ketjuvastuu-hanke ja monet muut elintarvikkeista tehdyt elinkaariarvioinnit ovat osoittaneet. Raaka-ainetuotannon toimintaympäristöt, -tavat ja -teknologiat ovat moninaiset, ja prosessien hajonta suurta sekä vaikeasti seurattavaa ja ennustettavaa. Hajontojen haltuun ottaminen on mahdollista konkreettisiin prosesseihin ulottuvan tiedon hallinnan avulla. Uusi tiedonhallintateknologia mahdollistaa sekä teknisesti että taloudellisesti faktatietojen hankinnan ja niiden käytön jyrkän lisäämisen ympäristön kuormittumista tilatasolla laskevissa malleissa ja tätä kautta niiden tulosten epävarmuuksien olennaisen pienentämisen. Tämä parannus hyödyttää sekä ympäristötietoa käyttäviä asiakkaita että raaka-ainetuottajia itseään. Tiedon avulla he pääsevät hyödyntämään ympäristökilpailukykyään, mihin nykyiset, keskiarvoihin nojaavat arviointimallit, eivät anna kunnon mahdollisuutta, koska eivät huomioi tilojen välisiä eroja,

## **2. Hankkeen tavoitteet**

Tässä hankkeessa keskityttiin konkreettisen kvantitatiivisen ympäristötiedon tuottamiseen tarkoitettun tiedonhallinnan kehittämiseen ja pilotointiin tilatasolla. Kohteena oli kolme raaka-ainetuotannon osa-alueita, joille arvioitiin eniten tarvittavan tilojen erityispiirteet huomioon ottavia laskentatyökaluja. Osa-alueet olivat viljelytoimintojen energian ja panosten käytön seuranta, peltolohkojen ravinnehuuhtoumien arviointi ja lypsykarjan käyttämien panosten ja päästöjen arviointi ja niiden kohdentaminen myytävälle eläimille ja maidolle.

Hankkeen konkreettiset tavoitteet olivat 1) kasvintuotannon prosessien panosten ja tuotosten sekä ympäristökuormitusten tilakohtaiseen seurantaan käytettävien mallien tekninen kehittäminen ja pilotointi, 2) lohko-kohtaisten ravinnehuuhtoumamallien kehittäminen ja pilotointi sekä 3) mitattuihin tietoihin nojautuvan karjamallin kehittäminen ja pilotointi lypsykarjatuotannon ympäristötietojen tuottamista varten.

Hankkeen tuloksilla on kaksi pääkäyttäjäryhmää, joille tulokset on ensisijaisesti suunnattu. Mallin loppukäyttäjät ovat viljelijöitä ja eläintuottajia, joiden ympäristötietojen hallintaa hankkeessa kehitetyt mallit on tarkoitettu palvelemaan. Mallin jatkokehitystä tekevät ja mallia tutkimuskäyttöön soveltavat tutkijat ovat toinen pääkäyttäjäryhmä, joiden panosta tarvitaan vielä kosolti mallien viemisessä tuotantoasteelle.

### 3. Hankeosapuolet ja yhteistyö

Hankkeen toteuttivat yhteistyössä MTT:n kasvintutkimuksen (MTT/KTL, materiaalivirtatietojen keruujärjestelmät), taloustutkimuksen (MTT/TAL, kirjanpitolajärjestelmää koskeneet kysymykset) ja biotekniikan ja elintarviketutkimuksen (MTT/BEL, systeemimallinnus) tutkijat Ravinnehuhtoumamallien kehitys tehtiin yhteistyössä Suomen Ympäristökeskuksen (SYKE) tutkijoiden kanssa. Hankkeen vastuullisena johtajana toimi vanhempi tutkija Yrjö Virtanen MTT/BEL yksiköstä.

### 4. Hankkeen vaiheet

#### 4.1. Kasvintuotannon prosessien panosten ja tuotosten seurantaan eri tasoilla käytettävien mallien tekninen kehittäminen ja pilotointi

Tässä osatehtävässä kehitettiin kasvintuotannon hierarkkinen tiedonhallintamalli tiloille. Mallissa on neljä hierarkian tasoa, jotka ovat alimmasta ylimpään: tehtävä-, lohko-, tuotantolinja- ja tuotetaso. Osatehtävässä käytetty päämenetelmä on relaatiomallinnus (engl. Entity-relationship modelling ERM) sovellettuna elinkaarimallinnukseen. Hierarkiatasojen väliset liittymät ovat relaatiomalleja, jotka kuvaavat ylemmän tason objektien, muodostumisen alemman tason objekteista. Mallia käytetään tilalla tuotettujen tuotteiden ympäristö- ja jäljitettävyystietojen hallintaan sekä tuotteiden elinkaarien ympäristövaikutusten laskentaan. Mallien kuvauksissa käytetyt pääkäsitteet ilmenevät taulukosta 1.

**Taulukko 1.** Hierarkkisen tiedonhallintamallin käsitteet.

Käsite	Merkitys
Systeemi, järjestelmä	Systeemi muodostuu hierarkkisesti yhdistetyistä l. aggregoiduista osasysteemeistä. Osasysteemit voivat edelleen sisältää toisia, yksilöidymiä osasysteemejä, kunnes on saavutettu hierarkian perustaso, jolla systeemit ovat jakamattomia. Hierarkian korkein taso on tilamalleissa tuotteen elinkaari.
Panosvirta, panos, syöte, input	Systeemiin sisään ottama virta. Alemmilla systeemitasoilla panokset ovat yleensä ainetta, energiaa tai maan käyttöä. Kaikki panokset ovat tarkoituksellisesti systeemiin syötettyjä tavoitellun tuotoksen aikaansaamiseksi.
Tuotosvirta, tuotos, tuote, output	Systeemistä ulostuleva virta. Alemmilla systeemitasoilla tuotokset ovat yleensä ainetta tai energiaa. Systeemin päätuotokset ovat tavoiteltuja ja hallitusti tuotettuja. Systeemi tuottaa usein myös rinnakkais- ja sivutuotteita. Kaikki systeemit tuottavat ilmaan ja vesiin päätyviä päästöjä sekä erilaatuisia kiinteitä, nestemäisiä ja kaasumaisia jätevirtoja.
IO	Lyhenne englanninkielisestä termistä Input-Output. Suomenkielisenä vastineena käytetään termiä "panos-tuotos" eli PT. IO:lla tarkoitetaan systeemin kaikkia panos- ja tuotosvirtoja.
Prosessi, tehtävä	Systeemihierarkian ja tiedonhallinnan perusyksikkö, joista yleisemmän tason systeemit muodostuvat. Prosesseja ovat esimerkiksi peltolohkon kyntö, itse peltolohko, viljasadon kuivaus. Energian käyttöä sisältäviä viljelyprosesseja kutsutaan myös tehtäviksi.
Tuotantolinja	Tuotantolinjat ovat tuotteiden elinkaarien osia. Niillä on määrätty päätuote, ja niiden panoksista suurin osa on tilan ulkopuolelta hankittavia välituotteita. Tyypiltään tuotantolinjat ovat gate-to-gate -osajärjestelmiä, joiden systeemirajat mukailevat tilan hallinta-alueen rajoja. Esimerkkejä tuotantolinjasta ovat mallasohran ja rehuohran tuotanto tilalla.
Tuotantoketju, tuotteen elinkaari, ulkoinen panosketju	Tuotantoketjut ovat gradle-to-gate – tyyppisiä tuotteiden elinkaarien osia Ne alkavat luonnon raaka-aineista ja päättyvät valmiisiin tuotteisiin. Tilan tuotteiden tuotantoketjuja kutsutaan tuotteiden elinkaariksi ja tuotantolinjoille panoksia, kuten polttoaineita, lannoitteita, siemeniä ja kasvinsuojelu-aineita, syöttäviä ja tuotantolinjan tuottamia jätteitä käsitteleviä tuotantoketjuja ulkoisiksi panosketjuiksi.
Instanssi	Aikaan (viljelyvuosi) sekä paikkaan (lohko) tai tuotantolinjaan tai tuotteeseen kiinnittyvä uniikki systeemiyksilö. Tilan malleissa esiintyy tehtäväinstansseja (lohko-vuosi tai päätuote - vuosi) kasvulohkoinstansseja (lohko-vuosi), viljelyinstansseja (lohko-vuosi), tuotantolinjainstansseja (päätuote-vuosi) ja tuotteen elinkaari-instansseja (päätuote-vuosi).



#### **4.1.1. Mallien tavoitteet ja systeemien rajaukset**

Kullakin hierarkian tasolla mallien tavoitteena on kuvata toiminnan panos- ja tuotosvirrat. Panokset käsittävät periaatteessa kaikki toimintaan käytetyt materiaalit ja energian. Kasvintuotannon prosessien panoksia ovat polttoaineet, sähköenergia, siemenet, lannoitteet, kasvinsuojeluaineet, tekniset apuaineet sekä sadon säilöntään ja suojaamiseen käytetyt aineet ja tarvikkeet. Tuotoksia ovat sato, sivuvirrat, päästöt ilmaan ja veteen sekä jätteet. Malleihin kerätään tavanomaisten panosten ja tuotosten lisäksi, ikään kuin sivutuotteina, tehtäviin käytetyt ajat sekä matkat, työstöpinta-alat ja kohdepinta-alat, joita voidaan hyödyntää muun muassa suoritusten arvioinneissa ja parannusten suunnittelussa.

Mallit kiinnittyvät todellisuuteen mittausjärjestelmillä, joilla kerätään kvantitatiiviset perustiedot, joista hierarkkisesti edeten muodostetaan panosten ja tuotosten kuvaukset ylemmille mallitasoille.

Mallien systeemirajat muodostuvat kaikilla järjestelmätasolla tehtävien elinkaarista lähtien. Systeemin elinkaari ja sen rajat muodostuvat siihen suoraan tai epäsuorasti liittyvien tehtävien elinkaarista ja näiden rajoista. Ajallisesti tämä merkitsee sitä, että systeemin elinkaari alkaa siitä, mistä sen ensimmäisen tehtävä alkaa ja päättyy siihen, mihin sen viimeinen tehtävä päättyy. Tehtävillä tarkoitetaan tässä sekä viljelytoimenpiteitä että kasvulohkon tehtävää, joka on tarjota kasvuympäristö viljelyille kasveille. Kasvulohkon tehtävän katsotaan päättyvän sen alkua seuraavan syyskuun lopussa tai siinä vaiheessa kun seuraavan, samalle lohkolle asettuvan systeemin ensimmäinen, samalle syksyille ajoittuva tehtävä alkaa, ja kasvulohko siirtyy uuteen systeemiin. Topologisesti systeemi ulottuu sekä ylä- että alavirtaan niin kauas kuin sen pisimmälle näissä suunnissa ulottuvien tehtävien elinkaaret ulottuvat. Systeemin kattama tila on se tila, jonka siihen kuuluvat tehtävät yhdessä kattavat elinkaariensa aikana.

Kasvintuotannon tehtävät määrätyllä peltolohkolla alkavat käytännössä lohkon maa-alan raivaamisella pelloksi ja päättyvät siihen, kun lohkon maa-ala siirtyy muuhun käyttöön, esimerkiksi metsätalousmaaksi. Systeemit rajataan tässä yhteydessä kuvaamaan kuitenkin vain tuotantoajanjaksoa peltolohkon olemassaolosta. Lisäksi systeemit rajataan niin, että ne kohdistuvat yhteen määrättyyn viljelykauteen. Jokaisella viljelykaudella on omat systeemit. Viljelykauden pituus on rajattu noin yhteen vuoteen, syksystä seuraavan vuoden syksyyn.

Tehtävät ovat sekä aikaan että paikkaan, ja jossain tapauksessa tuotteeseen, kiinnittyneitä instansseja. Esimerkiksi kyntö, joka usein aloittaa viljelyvuoden toiminnot määrätyllä lohkolle on instanssina olemassa vain määrätyn ajanjakson syksyllä ja tehdään vain tähän nimenomaiseen lohkoon ja viljelyvuoteen. Kuivaus on usein vastaavasti viljelyvuoden toiminnot määrätyllä lohkolle päättävä tehtävä, jonka jälkeen vilja on tuotteena valmis käytettäväksi. Myös se on instanssina olemassa vain määrätyn ajanjakson syksyllä ja kohdistuu yhteen määrättyyn lohkoon ja viljelyvuoteen. Tehtävän systeemiraja on tehtävän oma raja. Tehtäväinstansseihin sisältyy vain ulkopuolelta hankittujen panosten käyttö ja tästä aiheutuvat päästöt ympäristöön. Ne eivät sisällä panosten tuotantoketjuja eivätkä mahdollisten jätevirtojen käsittelyketjuja. Panosketjut yhdistetään tuotantolinjamalleihin siinä vaiheessa, kun halutaan mallintaa tilan tuotteiden koko ketjuja luonnon raaka-aineista portille.

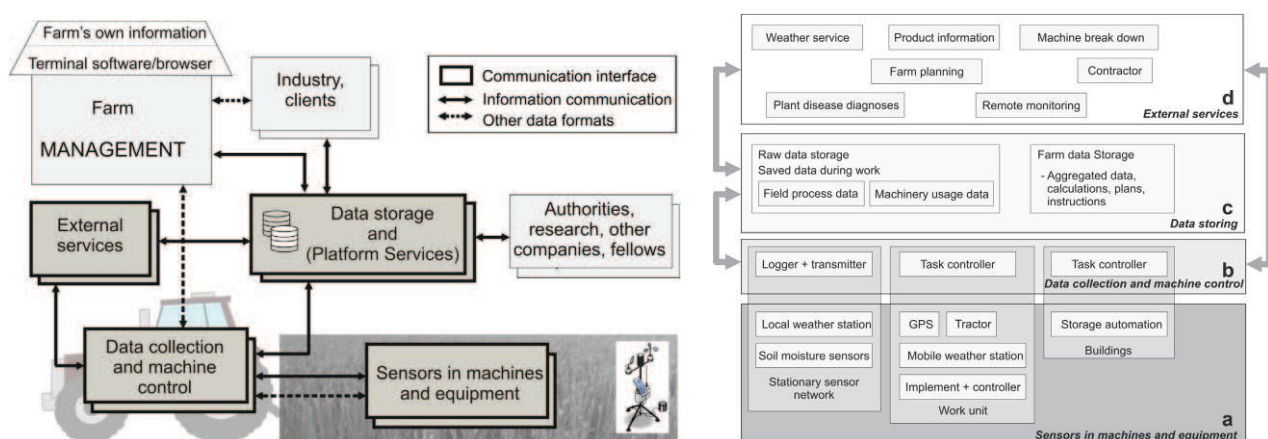
Malleissa tarkastellaan ilmastomuutokseen, happamoitumiseen, alailmakehän otsonin muodostumiseen ja vesien rehevöitymiseen vaikuttavia ilma- ja vesipäästöjä sekä polttoaine ja energiavirtoja. Tarkastelussa painotetaan vaikutuksia ilmastomuutokseen ja vesistöjen rehevöitymiseen, joissa alkutuotannon osuus koko elintarvikeketjusta on suuri.

#### 4.1.2. Perustietojen keruujärjestelmä

##### Cropinfra-tutkimus- ja kehitysalusta

Hankkeen perustietojen kerääminen tehtiin yhteistyössä MTT:n teknologiatutkimuksen Cropinfra-hankkeen kanssa, jossa MTT Vakolan tutkimusmaatilalle on kehitetty modernia kasvintuotannon tiedonhallinnan infrastruktuuria Cropinfraa. Cropinfra on moderni kasvintuotantotila koneineen, sensoriverkostoineen ja mittausjärjestelmineen, joka palvelee tutkimusmaatilana ja käsittää 150 hehtaaria viljeltävää peltopinta-alaa ja 250 hehtaaria metsää. Cropinfra toimii erilaisten maatalan älykkäitä prosessi- ja toimintaympäristöjä tutkivien projektien kohtaamisfoorumina, keskinäisenä tiedonvälittäjänä, alati kehittyvän teknologian tutkimuspaikkana sekä palvelee resurssitehokkaiden tuotantojärjestelmien vaatiman teknologian kehittämistä (lisätietoa: [www.vakola.fi](http://www.vakola.fi) ja [www.cropinfra.com](http://www.cropinfra.com)).

Cropinfran yhtenä kantavana ideana on, että eri palvelut/osajärjestelmät voivat olla eri toimittajien tarjoamia ja niitä voidaan korvata helposti vastaavilla osajärjestelmillä. Kuvassa 1 vasemmalla on esitetty Cropinfran tiedonhallinnan infrastruktuuri, joka on palveluperustainen (SOA, Service Oriented Architecture) järjestelmä [2]. Järjestelmä käsittää Internet-sovelluspalvelimen lisäksi paikkatietokannan, tietokannan muille tilatiedoille, liikkuvan laajakaistan modeemeineen, sekä liikkuvat ja stationääriset tiedonkeruuyksiköt mittausantureineen muokkaukseen, kylvöön, lannoitukseen, kasvinsuojeluun, sadonkorjuuseen ja maatalakohtaista ympäristö tiedonhallintaan.



**Kuva 1.** Vasemmalla Cropinfran SOA-perustaisen tiedonhallinnan toiminnallinen arkkitehtuuri ja oikealla tiedonhallinnan osat [2].

Cropinfran yksi tärkeä tehtävä on automatisoida tiedonkeruuta kasvintuotannon eri prosesseista. Kuvassa 1 oikealla on esitetty Cropinfran neljä ICT-perustaisesta teknistä tasoa, jotka kattavat maatalan pellot, koneet ja rakennukset. Tasot muodostuvat a) työkoneiden mittausjärjestelmistä, laitteista ja rakennuksista, b) tiedonkeruujärjestelmistä, c) tiedon ja datan tallennusjärjestelmistä ja d) ulkoisesta palvelukerroksesta. Tasojen avulla tiedonkeruu on mahdollista toteuttaa tehokkaasti ja helposti.

Kun Cropinfran kehittämisessä yhtenä tavoitteena on ollut teknisten ongelmien ja konseptien ratkomiseen, niin HierarchyNet-hankkeessa paneuduttiin perustiedon sisältöjen, laadun ja rakenteiden kehittämiseen yhtä aikaa relaatiomallinnusta ja käyttäjää paremmin palvelevaksi. Yhteistyö Cropinfra- ja HierarchyNet-hankkeen välillä olikin tiivistä ja synergiaetu oli konkreettisesti nähtävissä.

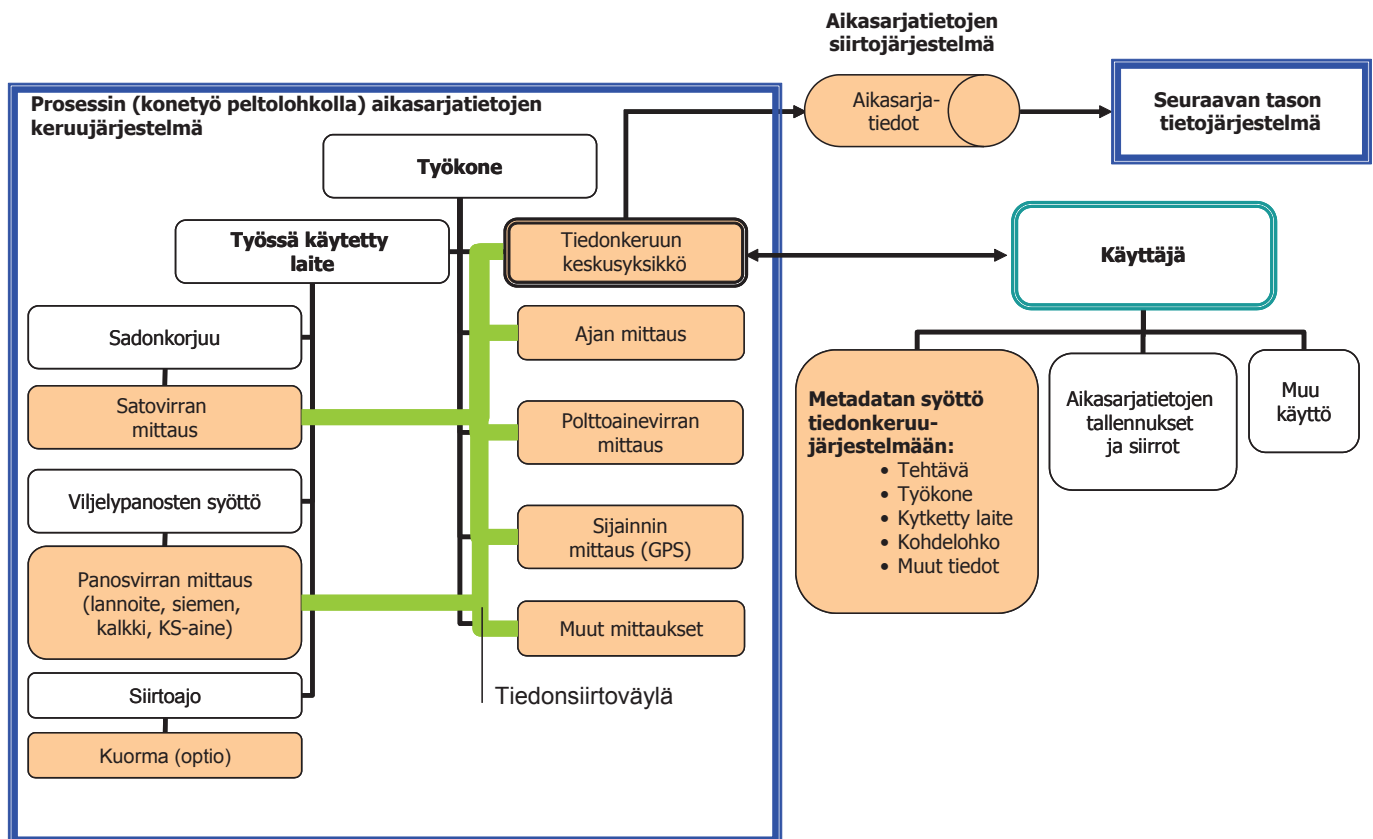


## Perustietojen keruujärjestelmän periaate

Perustiedot käsittävät mittaukset ja niiden metatiedot. Keruujärjestelmän periaate ilmenee kuvasta 1. Järjestelmä mittaa ja tallentaa tiedonkeruun keskusyksikössä olevaan muistiin työkoneen käyttämän polttoaineen virran ja koneen sijainnin sekä viljan puinnissa ja säilörehun teossa (noukinvaunulla) korjattavan sadon virran lyhyin (0.2 sekunnin) välein. Kerätyt perustiedot ja metatiedot siirretään tehtäväinstanssien relaatiomalliin, joka ilmenee kuvasta 2.

Lisäksi talletetaan työkoneen tilan määrittämiseen tarvittavat tiedot, kuten nostolaitteen asema, voiman ulosoton tila ja pyörimisnopeus, kylvölannoittimen, siementen ja lannoitteen syötön tila (päällä/pois), noukinvaunun noukkimen asema, puimurin leikkuupöydän asema jne. Järjestelmässä on valmius työkoneen identifiointitietojen, panosvirtojen säätäjien tilatietojen, ym. käyttöä edistävien tietojen keräämiseen sitten kun työkoneisiin tulevat vastaavien tietojen lähetysoikeudet. Nyt tiedot tehtävästä, työkoneesta ja siihen kytketyistä laitteista sekä siitä, mihin peltolohkoon prosessi suorituksen kuluessa milloinkin liittyy, annetaan järjestelmään manuaalisesti. Myöhemmin lohkokohdennuksessa on tarkoitus hyödyntää mitattuja sijaintitietoja ja lohkojen paikkatietoja.

Mittaus aloitetaan tehtävää suorittamaan lähdetessä ja päätetään vastaavasti, kun tilakeskukseen (tai vastaavaan tukikohtaan) on palattu tehtävän tultua suoritetuksi. Mittaus käsittää periaatteessa siis koko työrupeaman eli siirtymät ja varsinaiset työsuoritteet peltolohkoilla. Tässä hankkeessa tehtävät kohdistettiin teknisistä syistä kuitenkin aina vain yhteen lohkoon kerrallaan. Tulevissa järjestelmäversioissa konetyörupeama voi käsittää useampia peltolohkoja. Panosten ja tuotosten kokonaismäärät ja kohdennetaan työrupeaman kohteena olleille peltolohkoille erityisellä lohkotietojä ja työkoneen sijaintitietoja hyväksi käytävällä menetelmällä.

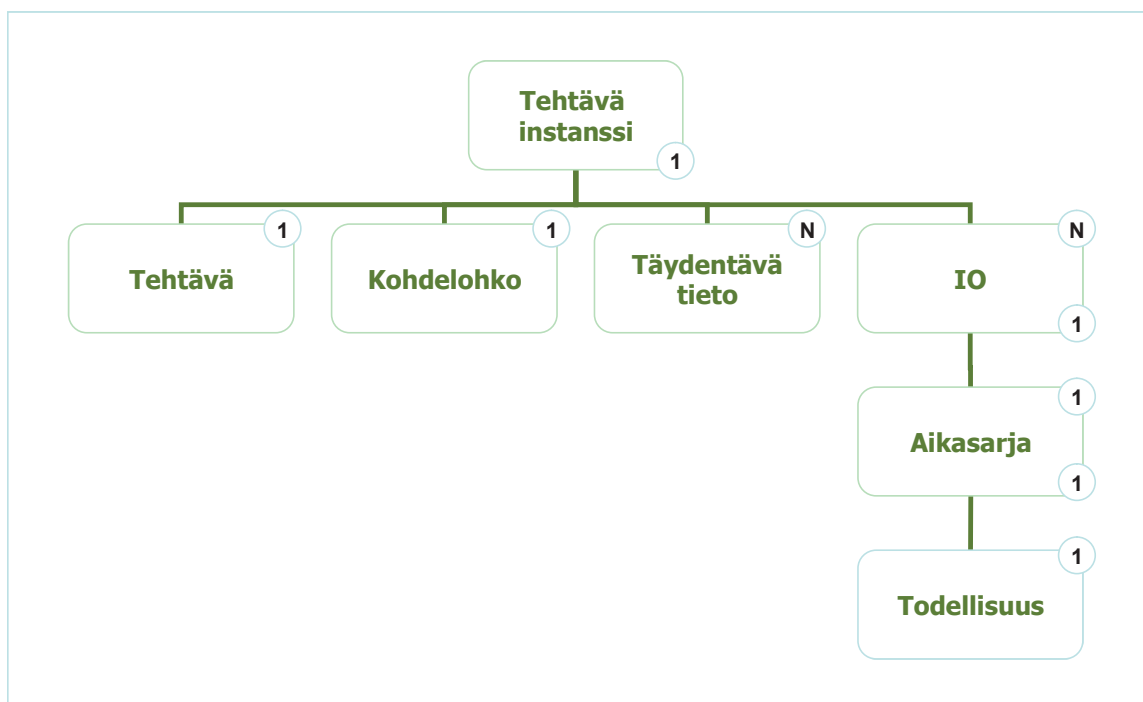


Kuva 1. Prosessitietojen keruujärjestelmän periaate.

### 4.1.3. Tehtävämallit

Tehtävämallit kuvaavat viljelyn aktiivisia perusprosesseja, tehtäväinstansseja, joille on ominaista energian käyttö mekaanisen työn tekemiseen (konetyö), tuotteiden tilan muutoksiin (viljan kuivaus) ja tuotantotilojen käytettävyyden ylläpitoon (jäähdytys, lämmitys, valaistus, ilmanvaihto). Tehtäväinstanssit ovat mallinnuksen näkökulmasta katsottuna alaprosesseihin jakautumattomia. Kasvulohko, joka on passiivinen perusprosessi, ei kuulu tehtäväinstanssien joukkoon, mutta on luonnollisesti mukana lohkon ja tuotantolinjan malleissa omalla mallillaan, jolla määritetään lohkolta lähtevät ilma- ja vesipäästöt käyttämällä lähtötietoina tehtävämallien ravinnepanos- ja satotietoja.

Tehtäväinstanssin relaatiomalli on esitetty kuvassa 2. Instansseilla on tehtävä, kohdelohko ja täydentävät määritteet (yhdessä metatiedot) sekä tehtävän suorittamiseen käytetyt panokset ja syntyneet tuotokset (yhdessä IO). Metatiedoista ilmenee tehtävän suorittamisen ajankohta, josta määräytyy se viljelyvuosi, johon tehtävä kohdistuu. Kohdelohkon tilalla on yksittäiseen lohkoon kohdentumattomissa tehtävissä, kuten viljan myyntikuljetuksissa, päätuote, johon tehtävä kohdennetaan. Periaatteena on, että kaikki tehtävät kohdennetaan joko lohkoille tai päätuotteille. Panoksilla ja tuotoksilla on edellä esitellyillä teknisillä järjestelmillä mitatut aikasarjat, joilla kuvataan niiden kertymisvauhti tehtäväinstanssin elinkaareissa ja joista niiden arvot saadaan integroimalla elinkaaren yli. Mittausten kautta malli kiinnittyy todellisuuteen.



**Kuva 2.** Tehtäväinstanssin relaatiomalli. Relaatiotyypit on merkitty muuttujia kuvaavien laatikoiden vastakkain oleviin kulmiin. Esimerkiksi Tehtäväinstanssi-IO –relaatio on 1-N eli yksi moneen ja kääntäen N-1 eli moni yhteen. Aikasarja-Todellisuus –relaatio taas on yksi yhteen.

Hankkeessa tutkitut **tehtävät** olivat aakkosjärjestyksessä seuraavat: *kesannon murskaus, kuivaus, kylvölannoitus, kylvömuokkaus, kyntö, lannoitus, niitto, ojamaiden lanaus, puinti, ruiskutus, säilörehun teko, siirtoajo ja tasausmuokkaus*. **Siirtoajomittaukset** käsittivät *perävaunukuljetukset* eli *panoskuljetukset* lohkolle, *viljan kuljetukset* kuivuriin ja *viljan maantiekuljetukset*, sekä koko joukon erillisesti mitattuja *siirtymiä* *traktori-työkone-yhdistelmillä*. Lähes jokaisesta tehtävästä mallinnettiin useampia instansseja: peltotyökoneinstansseja kaikkiaan 79 kappaletta, kuivauksia 17 kpl, erillisiä

siirtoajoja traktori-työkone-yhdistelmillä 39 kappaletta ja perävaunukuljetuksia 18 kappaletta. Ojamaiden lanauksesta ja panoskuljetuksesta lohkolle mallinnettiin yksi instanssi kummastakin.

### **Metatiedot**

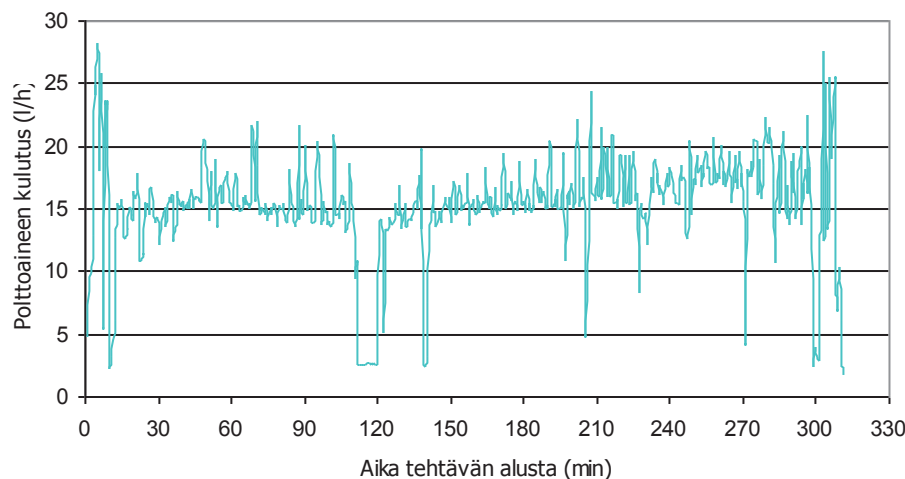
Tehtäväinstanssin metatiedoissa kuvataan tehtävän suorituksen aikana arvoltaan vakioina pysyvät muuttujat. Näiden muuttujien lukumäärä puolestaan ei ole vakio, vaan vaihtelee tehtävittäin, kuten muuttujien nimet ja merkityksetkin. Muuttujat määritellään tehtävään lähdetessä. Osa metatiedoista on (arvoltaan) useammalle instanssille yhteisiä, kuten tehtävä, kohdelohko ja työn suorittaja, osa yksilöllisiä, yhteen tai vain muutamaaan instanssiin liittyviä, kuten siemenen ja lannoitteen levitystiheydet (kg/ha). Yhteiset määritteet esiintyvät useammassa instanssissa. Esimerkiksi kylvölannoitus on kaikkien kylvölannoitusinstanssien tehtävä. Metatietoja käytetään relaatiomallissa tehtäväinstanssien liittämässä lohkoihin tai muuhun ylemmän tason kokonaisuuteen, kuten esimerkiksi työkoneurakointi, ja selittäjinä erilaisissa ja eri tason (lohko, tuotantolinja, tuotteen elinkaari) analyyseissä. Taulukossa 2 on esimerkki metatiedoista yksinkertaisimmillaan. Esimerkiksi kylvölannoituksen tapauksessa metatietoihin kirjataan taulukossa esiintyvien muuttujien lisäksi siemenen ja lannoitteen levitystiheydet (kg/ha).

**Taulukko 2.** Esimerkki tehtäväinstanssin metatiedoista. Muuttujat määritellään lähdetessä suoritamaan tehtävää.

Muuttuja	Arvo
Tehtävä	Kylvömuokkaus
Työn Suorittaja	Martti Korhonen
Ajankohta	20.5.2012 13:22:56
Lohko	Kirjava länt. A
Traktori	Valtra 8950
Työkone	Potila magnum 540

### **IO –tiedot**

Tehtäväinstanssin mitatut IO –tiedot kuvaavat tehtävän suorituksen aikana kertyneet panosten käytöt ja tuotokset. Mitattujen tietojen perusteella lasketaan suorituksesta aiheutuneet ilmapäästöt.



**Kuva 3.** Prosessitietojen keruujärjestelmällä mitattu polttoainevirran aikasarja tasausmuokkauksesta.

Kuvassa 3 on esimerkki polttoainevirralle mitatusta aikasarjasta. Polttoaineen käytön määrä tehtävässä, kuten kaikkien muidenkin, mitattujen IO – muuttujien arvot saadaan integroimalla niille mitatut aikasarjat elinkaaren yli:

$$IO = \sum_i \dot{IO}_i \Delta t_i, \quad (1)$$

missä

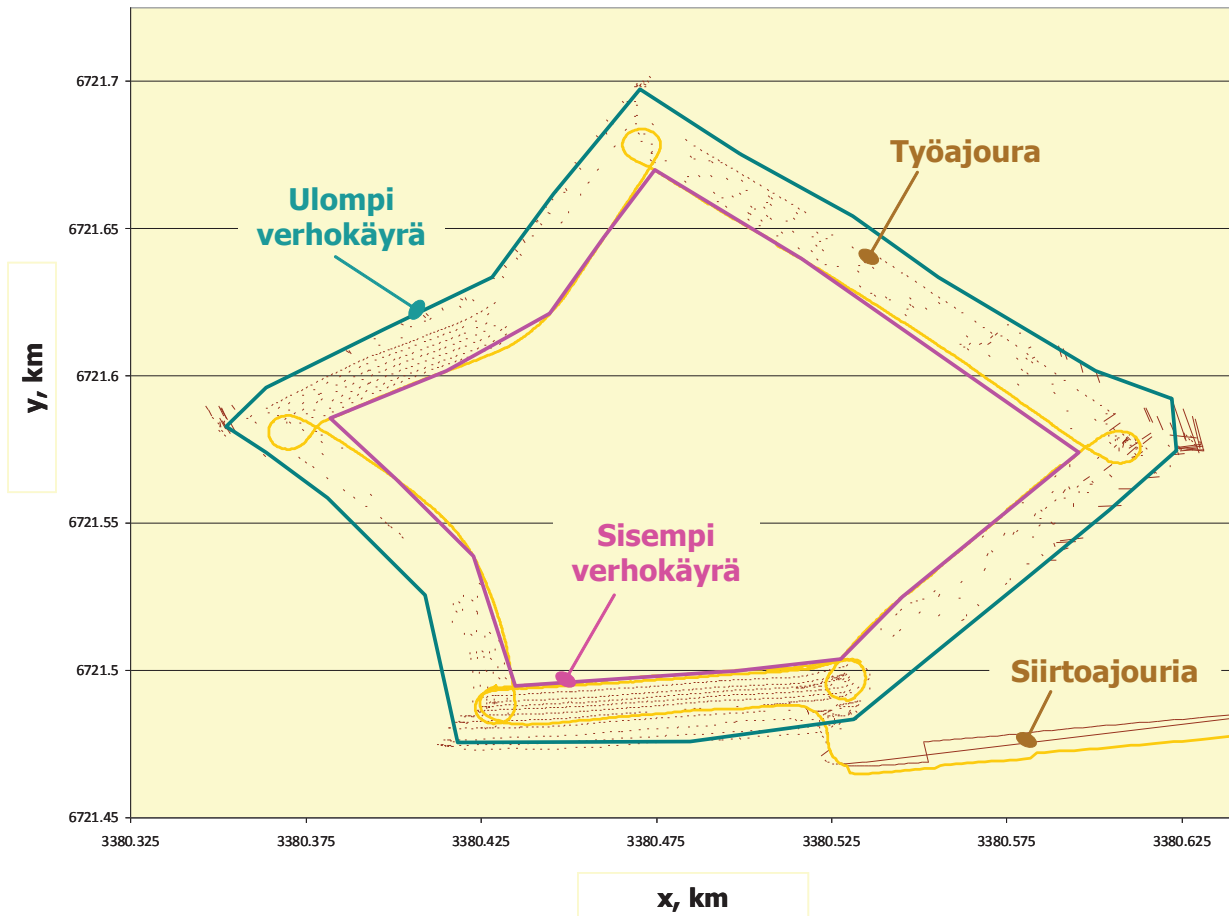
$$\dot{IO}_i = \frac{\Delta IO_i}{\Delta t_i}$$

on muuttujan kertymisvauhti aika-askeleella  $i$  ja  $\Delta t_i$  aika-askeleen pituus.

Poikkeuksen tästä tekee kohdepinta-ala ( $A_k$ ), joka lasketaan yhtälöllä:

$$A_k = \sum_u A_u - \sum_s A_s, \quad (2)$$

missä  $A_u$  on työajouran ulkopuolisen verhokäyrän rajaama pinta-ala ja  $A_s$  vastaavasti sisäpuolisen verhokäyrän rajaama pinta-ala. Kohdepinta-alaa käytetään panosten ja tuotosten hehtaariarvojen laskentaan niissä tapauksissa, joissa tehtävä kattaa vain osan kohdelohkosta. Kuvassa 4 on käsitteitä selventävä esimerkki, jossa on yksi ulompi ja yksi sisempi työajouran verhokäyrä. Kumpaakin voi kuitenkin olla useampia.



**Kuva 4.** Esimerkki tehtävainstanssin kohdepinta-alan määrittämisestä. Kohdealueelle voi muodostua yksi tai useampia ulompia ja sisempiä työajouran verhokäyriä.

IO – muuttujien integraaleissa kertymisvauhtia kuvaavat aikasarjat saadaan osin suoraan mittaustiedoista, kuten polttoainevirran ja ajan tapauksessa, osin ne lasketaan mitattuja arvoja ja metatietoja käyttäen. Laskentaa vaativat muuttujat ovat matka, työstöpinta-ala, sekä siemen-, lannoite- ja kasvinsuojeluainepanokset. Laskentakaavat näille ovat alla olevassa taulukossa 3. IO -muuttujia käsitellään integroinnin jälkeenkin virtoina. Nyt vain aika-askel on muuttunut tehtävän elinkaaren mittaiseksi.

**Taulukko 3.** Mittaustiedoista laskettujen aikasarjamuuttujien laskentakaavat.

IO	$\dot{IO}_i$	Lisätietoja
Matka	$= \frac{\sqrt{\Delta x_i^2 + \Delta y_i^2}}{\Delta t_i}$	$\Delta x_i$ ja $\Delta y_i$ ovat aika-askeleen $i$ mitatut koordinaattimuutokset
Työstöpinta-ala	$= L \frac{\sqrt{\Delta x_i^2 + \Delta y_i^2}}{\Delta t_i}$	$L$ on työkoneen työleveys, työkoneen ollessa työtilassa, muuten = 0
Panosvirta (siemen, lannoite, kasvinsuojeluaine)	$= m'' L \frac{\sqrt{\Delta x_i^2 + \Delta y_i^2}}{\Delta t_i}$	$m''$ on levitystiheys (kg/ha), levityksen ollessa käynnissä, muuten = 0

IO -muuttujien lukumäärä, nimet ja merkitykset vaihtelevat jonkin verran tehtävittäin. Kaikille työkonetehtäville yhteiset IO – muuttujat ilmenevät taulukosta 4 (esimerkki on kylvömuokkaus). Kylvölannoituksessa, lannoituksessa ja kasvinsuojeluaineruiskutuksessa on näiden lisäksi muuttujat asianomaisille panoksille (siemen, lannoite, kasvinsuojeluaine) ja puinnissa sadolle ja puimurin moottorin käyttämälle urealle. Järjestelmässä on ureavirran mittaustiedot myös traktorilla suoritettavissa tehtävissä, niitä tapauksia varten, joissa traktori käyttää ureaa ja on varustettu ureavirran mittarilla. Viljan kuivauksessa muuttujat ovat polttoaine, aika ja sähköenergia. Kuivattavan erän alkuperälohkot, alkupainot, kokonaisloppupaino, alkukosteudet ja loppukosteus on kirjattu metatietoihin.

**Taulukko 4.** Esimerkki tehtäväänstanssin IO -tiedoista.

Muuttuja	Arvo
Aika (s) Lohko, työtila, liikkeessä	1741.4
Aika (s) Lohko, työtila, paikallaan	155.2
Aika (s) Lohko, ei työtila, liikkeessä	15.6
Aika (s) Lohko, ei työtila, paikallaan	134.2
Aika (s) Lohko, yhteensä	2046.4
Aika (s) Siirtymä, liikkeessä	521.4
Aika (s) Siirtymä, paikallaan	142
Aika (s) Siirtymä, yhteensä	663.4
Aika (s) Yhteensä	2709.8
Matka (m) Lohko, työtila	4735.4
Matka (m) Lohko, ei työtila	7.3
Matka (m) Lohko, yhteensä	4742.6
Matka (m) Siirtymä, yhteensä	3416.6
Matka (m) Yhteensä	8159.2
Toimenpidepinta-ala(ha)	1.1
Työstöala (m <sup>2</sup> ) Yhteensä	25570.9
Polttoaine (dm <sup>3</sup> ) Lohko, työtila, liikkeessä	8.9
Polttoaine (dm <sup>3</sup> ) Lohko, työtila, paikallaan	0.2
Polttoaine (dm <sup>3</sup> ) Lohko, ei työtila, liikkeessä	0
Polttoaine (dm <sup>3</sup> ) Lohko, ei työtila, paikallaan	0.2
Polttoaine (dm <sup>3</sup> ) Lohko, yhteensä	9.4
Polttoaine (dm <sup>3</sup> ) Siirtymä, liikkeessä	1.5
Polttoaine (dm <sup>3</sup> ) Siirtymä, paikallaan	0.2
Polttoaine (dm <sup>3</sup> ) Siirtymä, yhteensä	1.7
Polttoaine (dm <sup>3</sup> ) Yhteensä	11.2

Tehtävissä syntyy traktoreiden ja leikkuupuimurin moottoreista sekä viljan kuivurissa kuivausilman lämmitykseen käytetyn öljypolttimesta ilmapäästöjä. Nämä lasketaan kertomalla polttoaineen ja urean määrät taulukosta 5 ilmenevillä päästökertoimilla. Ureaa käytetään uusissa moottoreissa, joissa sen avulla poistetaan pakokaasuista typpioksidia Euro IV ja Euro V -päästönormien vaatimusten täyttämiseksi. Pilotoinnissa oli mukana ureamoottorilla varustettu leikkuupuimuri. Hienoinen ero traktorin ja leikkuupuimurin moottorien päästökertoimissa taulukossa 5 ei kuitenkaan johdu ureasta, vaan leikkuupuimurin moottorin suuremmasta keskimääräistä kuormitusasteesta, jota on käytetty LIPASTO – laskentajärjestelmässä, josta moottorien päästökertoimet ovat peräisin.

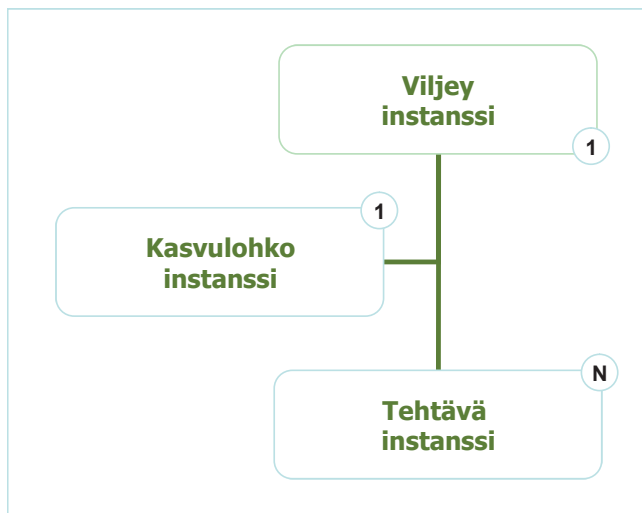
**Taulukko 5.** Työkoneiden moottoreiden ja kuivurin öljypolttimen ilmapäästökertoimet. Moottoripäästökerrointen lähde on LIPASTO -laskentajärjestelmä, VTT [3]; Urean kertoimet laskettu NO -pelkistykseen reaktioyhtälöstä  $NH_2CONH_2 + 2NO + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow 2N_2 + CO_2 + 2H_2O$ , urealiuokselle, jonka pitoisuus on 32.5 %. Öljypolttimen päästökertoimien lähteet ovat Tilastokeskus [4] ( $CO_2$ ), IPCC [5] ( $CH_4$  ja  $N_2O$ ) ja Pöyry [6] ( $NO_x$ , PM ja  $SO_2$ ).

Päästö ilmaan	Traktorit, g/kg polttoaine	Leikkuupuimurit, g/kg polttoaine	Moottorit, g/kg urea (32.5 %)	Kuivurin lämmityspoltin, g/kg polttoaine
CO	9.8	8.6	0	0.12
NM VOC	3.3	2.7	0	0.0018
NO <sub>x</sub>	26	25	-325	2.7
PM	1.4	1.2	0	0.063
CH <sub>4</sub>	0.18	0.18	0	0.43
N <sub>2</sub> O	0.085	0.084	0	0.026
SO <sub>2</sub>	0.020	0.020	0	1.2
CO <sub>2</sub>	3105	3085	238	3100

#### 4.1.4. Lohkomallit

Lohkomallissa liitetään yhteen määrättynä viljelyvuonna lohkolta toimitettujen tehtävien, siellä tapahtuneen kasvun ja lohkolta saadun sadon jatkokäsittelyn tehtävien mallit. Yhdistämisen tuloksena syntyy yhtä viljelykautta kyseisellä lohkolta kuvaava malli, viljelyinstanssi (lohko-vuosi), jonka relaatiomalli nähdään kuvassa 5. Yhdistävinä muuttujina ovat lohko ja vuosi. Viljelyinstanssilla on sen tehtäviltä ja kasvulohkolta periytyvät metatiedot, panokset, tuotokset, sivuvirrat, päästöt ilmaan ja veteen sekä jätteet.





**Kuva 5.** Viljelyinstanssin relaatiomalli. Relaatiotyypit on merkitty muuttujia kuvaavien laatikoiden vastakkain oleviin kulmiin. 1-N-relaatio on yksi moneen 1-1 yksi yhteen.

### **Tehtäväinstansseilta periytyvät panos- ja tuotosvirrat**

Viljelyinstanssi perii kaikkien tehtäväinstanssiensa panos- ja tuotosvirrat, jotka integroidaan nimikkeittäin yhtälön:

$$IO_i = \sum_j IO_{i,j} \quad (3)$$

mukaan, missä siis  $IO_{i,j}$  on virta ( $i$ ) tehtäväinstanssissa ( $j$ ).

Mitatut panosvirrat ovat siemenet, lannoitteet, polttoaineet, moottoreissa käytetty urea, kasvinsuojeluaineet ja sähköenergian. Mitatut tuotokset käsittävät puintien sadot sekä kuivaukseen sisään syötettyjen ja sieltä ulos otettujen valmiiden viljaerien painot. Mittaustarkkuuksiksi arvioidaan sähköenergian mittauksissa 2 %, polttoainevirtojen ja kuivurin massavirtojen mittauksissa  $\pm 5$  %, kylvölannoittimen siemen- ja lannoitevirtojen mittauksissa  $\pm 10$  % ja kasvinsuojeluainevirtojen sekä pinalannoittimen lannoitevirtojen mittauksissa  $\pm 15$  %.

Viljelyinstanssille tehtäväinstansseista siirtyvät päästöt (nimet edellä taulukossa 5) on arvioitu päästökerroinmalleilla polttoainevirroista. Päästökertoimien, jotka nekin perustuvat toisaalla tehtyihin mittauksiin, epävarmuudet vaihtelevat päästöittäin suurimpien suhteellisten epävarmuuksien ilmetessä yleensä kaikkein pienimmissä päästöissä. Hiilidioksidin pitoisuus pakokaasuissa on yli 10 %, minkä ansiosta se pystytään mittaamaan hyvin tarkasti. Ottaen tämän lisäksi huomioon polttoaineiden hiilipitoisuuksien ja palamisessa tapahtuvan vaihtelun sekä polttoainevirtojen mittausten epävarmuuden, arvioidaan CO<sub>2</sub> -päästöestimaattien epävarmuudeksi  $\pm 10$  %. Muiden päästöjen epävarmuudeksi arvioidaan  $\pm 20$  %.

### **Kasvulohkolta periytyvät päästöt ilmaan ja veteen**

Kasvulohkon mallilla lasketaan estimaatit lohkolta viljelykaudelta kertyville ilmapäästöille ja ravinnehuuhtoumille. Mallissa, joka koostuu useammasta, eri päästöjen laskentaan tarkoitetusta osamallista, esiintyvät muuttujina lohkolle tuodut ravinteet ja kalkitusaineet, biologisissa prosesseissa (orgaanisen aineen hajoaminen, typen sidonta) vapautuvat ravinteet ja hiili sekä lohkolta poistetut ravinteet. Ilmapäästöt ja ravinnehuuhtoumat lasketaan tehtäväinstanssien panoksista ja tuotoksista (**IO**) taulukossa 6 yleisesti kuvatuilla menetelmillä. Mallissa ovat otsaketasolla mukana kansallisissa

ammoniakki- ja kasvihuonekaasupäästöjen inventaarioissa nykyisin käsitellyt peltoviljelyn ja -maan käytön päästöt ja niiden lähteet. Tarkastelemme niitä lähemmin seuraavassa.

- **NH<sub>3</sub>-ja NO- päästöt ilmaan**

NH<sub>3</sub>-ja NO- päästöt ilmaan lasketaan summaamalla panosvirtojen kuljettamista typpivirroista haihtuvat päästövirrät eli

$$NH_3(\mathbf{IO}) = \frac{M_{NH_3}}{M_N} \sum_i a_{NH_3,i} x_{N,i} IO_i \quad (4a)$$

ja

$$NO(\mathbf{IO}) = \frac{M_{NO}}{M_N} \sum_i a_{NO,i} x_{N,i} IO_i, \quad (5a)$$

missä  $x_{N,i}$  on panosvirran ( $IO_i$ ) typpipitoisuus ja  $a_{NH_3,i}$  panosvirran tyyppistä ammoniakista ja  $a_{NO,i}$  vastaavasti typpioksidina haihtuva osuus, eli ominaispäästökerroin panosvirran sisältämälle typpelle.  $M_{NH_3}$ ,  $M_{NO}$  ja  $M_N$  ovat ammoniakin ( $NH_3$ ), typpioksidin ( $NO$ ) ja typen ( $N$ ) moolipainot.

Ominaispäästökertoimien arvoina käytetään Suomen ympäristökeskuksessa [7] tehdystä, niin kutsutusta typpimallista suoraan johdettuja arvoja. Suomen ympäristökeskus ylläpitää ja käyttää typpimallia kansallisen ammoniakkipäästö-inventaarion laatimisessa ja sitä käytetään myös kansallisen kasvihuonekaasu-inventaarion teossa. Typpimallissa on mukana käytännössä kaikkien erilaisten Suomessa toimivien eläintuotantosuuntien kaikki erilaiset lantaketjut (myös eriytetyt sonta- ja virtsaketjut) eläinsuojasta peltoon. Lisäksi mallissa on peltoon pannuista keinolannoitteista aiheutuvat typpipäästöt laskeva osamalli.

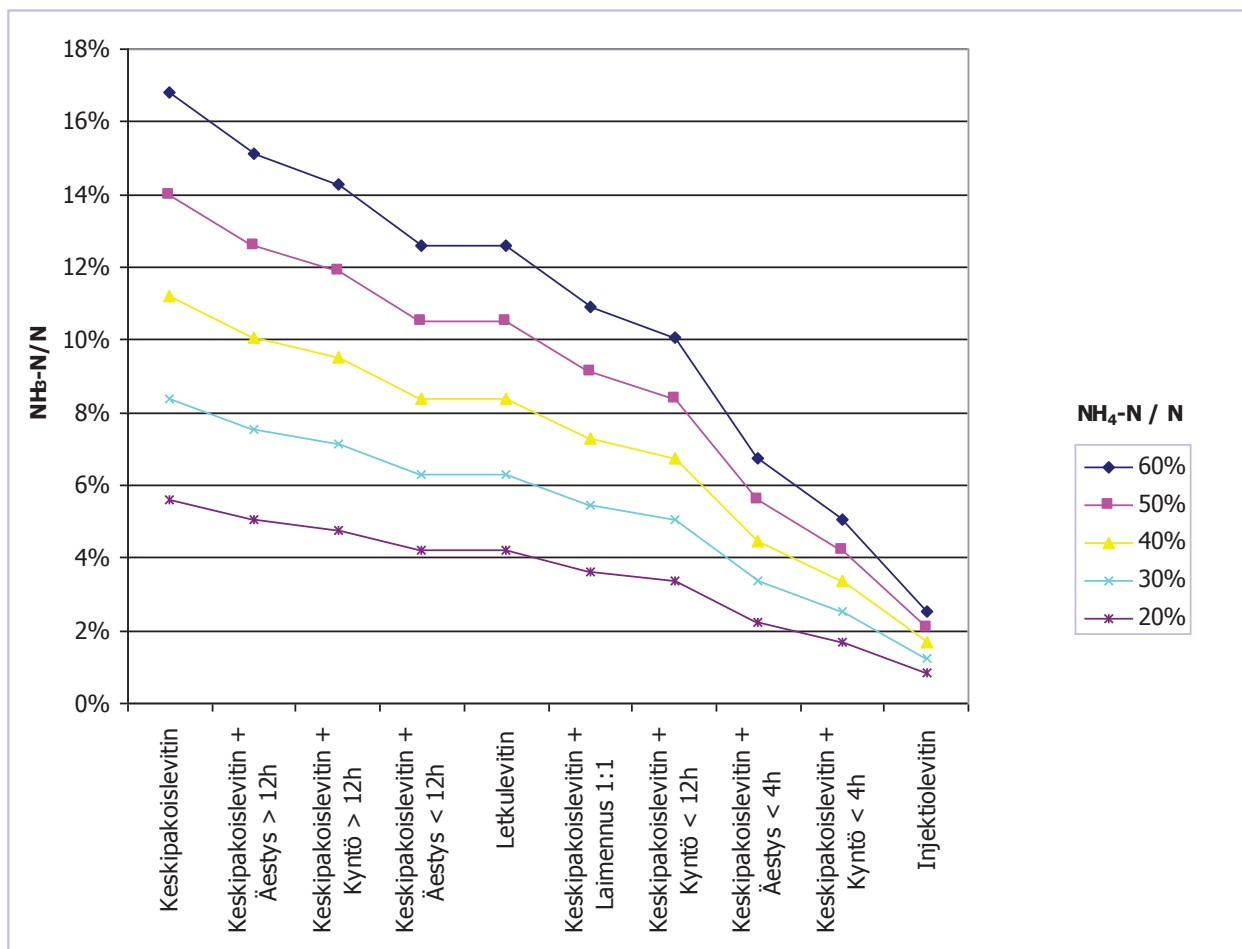
Taulukossa 7 on annettu keinolannoitteiden ominaispäästökertoimet lannoitetyypeittäin viljan ja nurmen viljelylle. Taulukosta ilmenee, että Suomessa pääasiallisesti käytettävien lannoitteiden, 'Kalsiumammonium-nitraatti' sekä 'Muut NK ja NPK lannoitteet', NH<sub>3</sub> -ominaispäästökertoimet arvioidaan nurmiviljelyssä noin viisinkertaisiksi viljan viljelyyn verrattuna. Typpioksidin ominaispäästökertoimelle käytetään kaikissa tapauksissa samaa arvoa.

**Taulukko 6.** Kasvulohkon päästöjen laskentamenetelmien yleiskuvaus.

Päästö ja relaatio	Lisätietoja	
Ammoniakkipäästö ilmaan, $NH_3 = NH_3(IO)$	Laskennassa käytetään kontekstista riippuvia päästökertoimia. Päästökertoimet on johdettu suoraan typpimallista.	(4)
Typpioksidipäästö ilmaan, $NO = NO(IO)$	Laskennassa käytetään kontekstista riippuvia päästökertoimia. Päästökertoimet on johdettu suoraan typpimallista.	(5)
Dityppioksidipäästö ilmaan $N_2O = N_2O(IO)$ $+ N_2O(N_{cr}) + N_2O(N_{bf}) + N_2O(A_{os})$ $+ N_2O(N_{NH_3} + N_{NO}) + N_2O(N_{leach})$	Suorat $N_2O$ -päästöt $N_2O(IO)$ lasketaan suoraan typpimallista johdetuilla menetelmillä. Lisäksi suoriin päästöihin lasketaan mukaan lohkolle jäävien satotähteiden tyyppistä ( $N_{cr}$ ), biologisesta typensidonnan tuottamasta tyyppistä ( $N_{bf}$ ) sekä orgaanisen aineksen hajoamisesta orgaanisissa (turve-)maissa seuraavat $N_2O$ -päästöt (muuttujana on tällöin lohkon pinta-ala, $A_{os}$ ). Näiden päästöjen laskentaan käytetään Suomen kasvihuonekaasuinventaariorissa [9] käytetyillä menetelmillä tai niistä suoraan johdetuilla menetelmillä. Epäsuorat $N_2O$ -päästöt lasketaan lohkon ammoniakki- ja typpioksidipäästön typen summasta, $N_{NH_3} + N_{NO}$ ja huuhtoutuneesta tyyppistä $N_{leach}$ typpimallissa käytetyllä menetelmällä.	(6)
Hiilidioksidipäästö ilmaan $CO_2 = CO_2(IO) + CO_2(\Delta C)$	Kalkituksesta syntyvät $CO_2$ - päästöt $CO_2(IO)$ lasketaan Suomen kasvihuonekaasuinventaariorissa [9] käytetyistä menetelmistä suoraan johdettuja menetelmiä käyttäen. Maan hiilivaraston muutoksessa ( $\Delta C$ ) vapautuvaa $CO_2$ tai ei ole mukana mallin tässä versiossa.	(7)
Typpihuuhtouma $N_{leach} = N_{leach}(IO)$	Laskennassa käytetään panos- ja tuotosvirtojen sisältämiä typen määriä typpitaseen laskemiseen ja typpihuuhtouman laskemiseen kontekstista riippuvia tilastollisia funktioita. Seuraavan sukupolven laskennassa tilastolliset funktiot on korvattu valuma-aluemallista kehitetyllä lohkosovelluksella	(8)
Fosforihuuhtouma $P_{leach} = P_{leach}(IO)$	Laskennassa ei käytetä fosforitasetta, vaan fosforihuuhtouma määräytyy kokonaan huuhtoumakontekstista tilastollisten funktioiden avulla. Seuraavan sukupolven laskennassa tilastolliset funktiot on korvattu valuma-aluemallista kehitetyllä lohkosovelluksella	(9)

**Taulukko 7.** Keinolannoitteista syntyvien  $\text{NH}_3$ - ja  $\text{NO}$ -päästöjen typen ominaispäästökertoimet viljan ja nurmen viljelyssä osuutena (%) levitykseen menevästä kokonaistypestä (N), typpimallin [7] tiedoilla laskettuina. Vuoden 2007 keskiarvo on laskettu painottaen keinolannoitteiden päästökertoimia niiden osuuksilla yhteenlasketusta keinolannoitetypistä kyseisenä vuonna, osuudet typpimallista [7].

Lannoitetyyppi	Viljan viljely		Nurmen viljely	
	$\text{NH}_3\text{-N/N}$	$\text{NO-N/N}$	$\text{NH}_3\text{-N/N}$	$\text{NO-N/N}$
Typpiluookset	70.0	7.0	70.0	7.0
Urea	57.5	7.0	230.0	7.0
Ammoniumsulfaatti	7.5	7.0	15.0	7.0
Ammoniumfosfaatti	7.5	7.0	15.0	7.0
Ammoniumnitraatti	3.0	7.0	16.0	7.0
Kalsiumammoniumnitraatti	3.0	7.0	16.0	7.0
Muut NK ja NPK lannoitteet	3.0	7.0	16.0	7.0
Muu nitraatti	2.5	7.0	5.0	7.0
<b>Keskimäärin vuonna 2007</b>	<b>3.0</b>	<b>7.0</b>	<b>16.0</b>	<b>7.0</b>

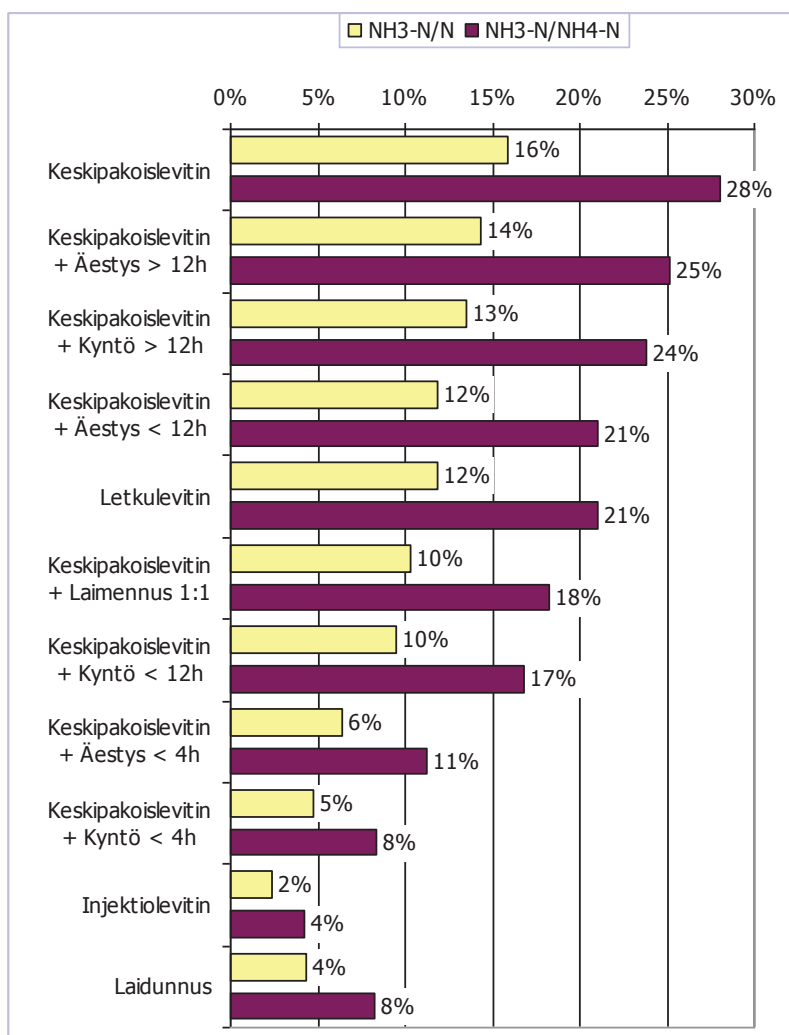


**Kuva 6.** Naudan lietalannan levitusteknologioiden  $\text{NH}_3$ -päästökertoimet ( $\text{NH}_3\text{/N}$ ) osuutena (%) levitykseen menevästä kokonaistypestä (N). Parametrina ammonium typen osuus kokonaistypestä ( $\text{NH}_4\text{-N/N}$ , %). Ammoniakin haihtumisosuudet ammoniumtypestä on laskettu typpimallin [7] tiedoilla.

Mitattuihin tehtäviin ei sisältynyt lannan eikä myöskään puhdistamolietteiden käyttöä kasvulohkoilla. Typpimallissa ei ole vielä puhdistamolietteiden laskentaa mukana, joten se puuttuu myös tästä mallista. Lanta huomioidaan kuitenkin kasvulohkomallissa panosvirtana. Toistaiseksi sen määrät arvioidaan tai mitataan automaattisen tiedonkeruujärjestelmän ulkopuolella ja siirretään mallinnusjärjestelmään erillisen liittynän kautta.

Typpimallista lasketaan ammoniakkin ominaispäästökertoimet lannan levityksessä haihtuvalle ammoniakille ja ammoniakista syntyvälle  $N_2O$  -päästölle sekä haihtumisen jälkeen maahan jäävästä tyyppimallista muodostuvalle  $N_2O$  -päästölle. Typpimallissa ei ole mukana lannan tyyppistä haihtuvan typpioksidin laskentaa.

Kuvassa 6 on esimerkki naudan lietelannan  $NH_3$  -typen ominaispäästökertoimista (% levitykseen tulevasta kokonaistyyppistä) eri levitysteknologioilla ja ammonium typen ( $NH_4-N$ ) osuuksilla lannan kokonaistyyppistä. Kuvasta 7 käyvät ilmi eri levitysteknologioiden  $NH_3$  -typen ominaispäästökertoimet lietelannan keskimääräisellä ammoniumtyppipitoisuudella osuuksina levitykseen tulevasta kokonaistyyppistä (% levitykseen tulevasta kokonaistyyppistä) ja ammonium tyyppistä (% levitykseen tulevasta ammonium tyyppistä).



**Kuva 7.** Keskimääräisen naudan lietelannan  $NH_3$  -päästökertoimet osuutena levitykseen menevästä kokonaistyyppistä ( $N$ ) ja ammonium tyyppistä ( $NH_4-N$ ) eri levitysteknologioilla. Ammonium typen osuus kokonaistyyppistä ( $NH_4-N/N$ ) 57 % [8]. Ammoniakin haihtumisosuudet ( $NH_3-N/NH_4-N$ ) laskettu lähteen [7] tiedoilla.

• **N<sub>2</sub>O päästöt ilmaan**

Viljelypanoksien sisältämästä typestä syntyvien N<sub>2</sub>O – päästöt lasketaan typpimallista johdetuilla ominaispäästökertoimilla. Epäsuorat N<sub>2</sub>O – päästöt lasketaan NH<sub>3</sub>- ja NO – päästöille edellä kuvatuilla menetelmillä lasketuista kokonais-määristä:

$$N_2O(N_{NH_3} + N_{NO}) = \frac{M_{N_2O}}{M_N} a_{N_2O} \left( \frac{M_N}{M_{NH_3}} NH_3 + \frac{M_N}{M_{NO}} NO \right), \quad (6a)$$

missä  $a_{N_2O} = 0.01$  on N<sub>2</sub>O:ksi laskeumien kautta muuntuvan typen osuus kasvulohkolta haihtuvasta NH<sub>3</sub>- ja NO- typestä. Epäsuoraan päästöön lisätään typpihuuhtoumasta kasvulohkon ulkopuolella syntyvä N<sub>2</sub>O,

$$N_2O(N_{leach}) = \frac{M_{N_2O}}{M_N} a_{N_2O} N_{leach}, \quad (6b)$$

missä  $a_{N_2O} = 0.0075$  on kasvihuonekaasuinventaariossa käytetty [10] kerroin lohkolta huuhtoutuneesta typestä ( $N_{leach}$ ) N<sub>2</sub>O:ksi muuntuvan typen osuudelle. Typpihuuhtouma lasketaan erillisellä mallilla.

**Taulukko 8.** *Keinolannoitteista syntyvien N<sub>2</sub>O -päästöjen typen ominaispäästökertoimet viljan ja nurmen viljelyssä osuutena (%) levitykseen menevästä kokonaistypestä (N), typpimallin [7] tiedoilla laskettuina. Vuoden 2007 keskiarvo on laskettu painottaen keinolannoitteiden päästökertoimia niiden osuuksilla yhteenlasketusta keinolannoitetypestä kyseisenä vuonna, osuudet typpimallista [7].*

Lannoitetyyppi	Viljan viljely		Nurmen viljely	
	Suora N <sub>2</sub> O-N	Epäsuora N <sub>2</sub> O-N	Suora N <sub>2</sub> O-N	Epäsuora N <sub>2</sub> O-N
Typpiliuokset	11.5	0.8	11.5	0.8
Urea	11.7	0.6	9.5	2.4
Ammoniumsulfaatti	12.3	0.2	12.2	0.3
Ammoniumfosfaatti	12.3	0.1	12.2	0.2
Ammoniumnitraatti	12.3	0.1	12.2	0.2
Kalsiumammoniumnitraatti	12.4	0.1	12.2	0.2
Muut NK ja NPK lannoitteet	12.4	0.1	12.2	0.2
Muu nitraatti	12.4	0.1	12.2	0.2
<b>Keskimäärin vuonna 2007</b>	12.4	0.1	12.4	0.1

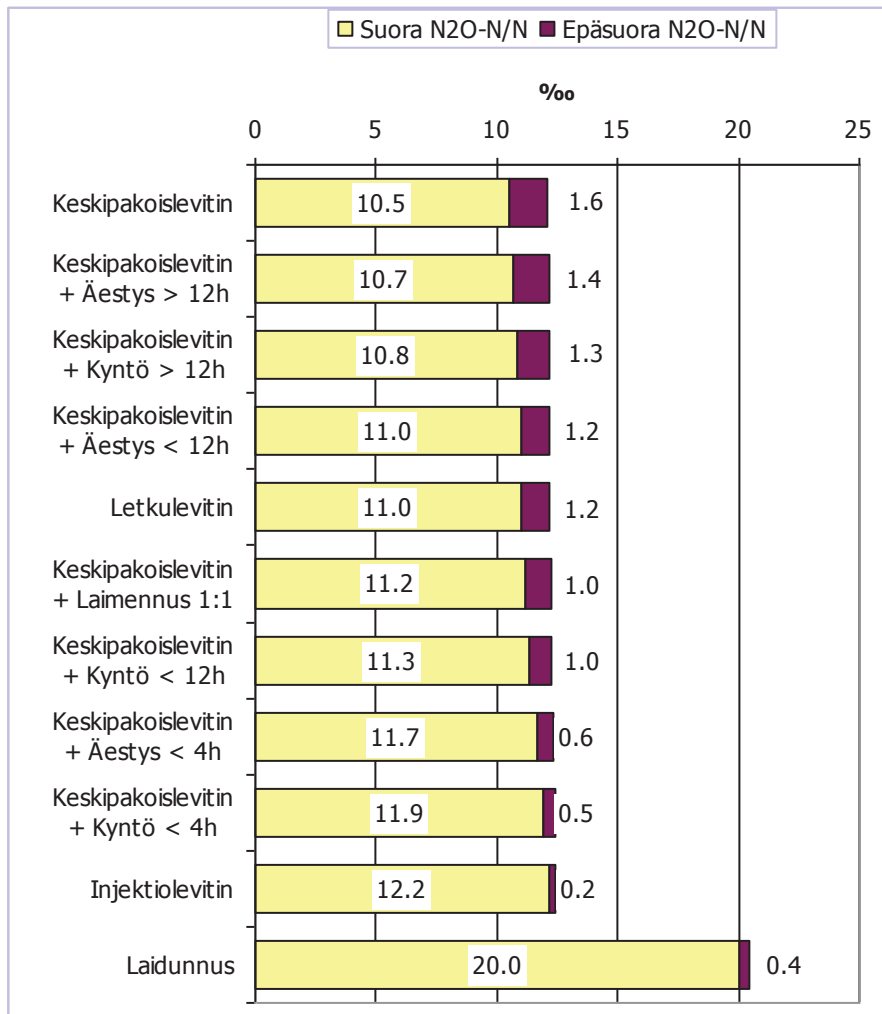
Kasvulohkolle tuoduista typpipanoksista aiheutuvat suorat N<sub>2</sub>O -päästöt arvioidaan typpimallista suoraan johdettavilla ominaispäästökertoimilla:

$$N_2O(IO) = \frac{M_{N_2O}}{M_N} \sum_i a_{N_2O,i} x_{N,i} IO_i, \quad (6c)$$



missä  $x_{N,i}$  on panosvirran ( $IO_i$ ) typpipitoisuus ja  $a_{N_2O,i}$  panosvirran tyyppä dityppioksidina haihtuva osuus,  $M_{N_2O}$  ja  $M_N$  ovat dityppioksidin ( $N_2O$ ) ja typen ( $N$ ) moolipainot.  $N_2O$  -haihtumat lasketaan typpimallissa  $NH_3$ - ja  $NO$ - haihtumien jälkeen maahan jäävästä tyyppästä.

Ominaispäästö-kertoimet,  $a_{N_2O,i}$  ovat osuuksia levitykseen tulevasta tyyppästä. Taulukossa 8 on annettu suoran ja epäsuoran  $N_2O$  – päästön ominaiskertoimet keinolannoitteille promilleina levitykseen tulevasta tyyppästä. Kuvassa 8 on esimerkki vastaavista kertoimista keskimääräiselle lietelannalle eri levitysteknologioilla.



**Kuva 8.** Keskimääräisen naudan lietelannan  $N_2O$  -päästökertoimet osuutena (‰) levitykseen menevästä kokonaistyyppästä ( $N$ ) eri levitysteknologioilla. Kuvassa lisäksi sekä laidunnuksessa lohkolle leviävän lannan kertoimet. Ammonium typen osuus lietelannan kokonaistyyppästä ( $NH_4-N/N$ ) 57 % [8] ja laidunnuksen lannasta 53 % (typpimalli). Ammoniakin haihtumisosuudet ( $NH_3-N/NH_4-N$ ) laskettu typpimallin [7] tiedoilla.

Panosvirtojen tyyppästä johtuvien  $N_2O$  -päästöjen lisäksi mallissa huomioidaan lohkolle jäävien satotähteiden ja biologisen typensidonnann tuottamasta tyyppästä, sekä orgaanisten maiden hiilivaraston muutoksen vapauttamasta tyyppästä aiheutuvat  $N_2O$  -päästöt.

**Satotähteiden tyypestä** ( $N_{cr}$ ) haihtuva  $N_2O$  lasketaan yhtälöstä

$$N_2O(N_{cr}) = \frac{M_{N_2O}}{M_N} a_{N_2O} N_{cr} \quad (6d)$$

missä  $a_{N_2O} = 0.0125$  on  $N_2O$ :na haihtuvan typen osuus satotähteiden tyypestä [9].

Satotähteillä tarkoitetaan kasvien koko maanpäällistä biomassaa vähennettynä lohkolta korjatulla ja siellä poltetulla biomassalla. Tähteiden tyyppivirta arvioidaan sadosta yhtälön

$$N_{cr} = \sum_c N'_{cr} m_c, \quad (6e)$$

mukaan, missä  $N'_{cr}$  on tähteiden tyyppi–sato–suhte (kg N/kg KA sato) ja  $m_c$  kuiva-ainesato. Satoa tuottavia kasveja on tavallisesti vain yksi, mutta joissain tapauksissa voi olla useampikin satoa tuottava kasvi. Satotähteiden typen laskennassa huomioidaan kaikkien sadossa mukana olevien kasvien tähteet.

Taulukossa 9 on annettu kansallisessa kasvihuoneinventaariorissa käytetyt arvot tähteiden tyyppipitoisuuksista, tähde-sato-suhteista ja tähteiden tyyppi-sato-suhteista.

**Taulukko 9.** Suomen kansallisessa kasvihuonekaasuinventaariorissa käytetyt viljelykasvien satotähteiden tyyppipitoisuudet ja tähde-sato-suhteet sekä niistä lasketut tähteiden tyyppi–sato–suhteet [9].

Viljelykasvi	Tähteiden tyyppipitoisuus, Kg N/kg KA	Tähteet/sato, kg KA/kg KA	Tähteiden tyyppi/sato, kg N/kg KA
Syysvehnä	0.0028	1.30	0.0036
Kevätvehnä	0.0028	1.30	0.0036
Ruis	0.0048	1.60	0.0077
Ohra	0.0043	1.20	0.0052
Kaura	0.0070	1.30	0.0091
Sekavilja	0.0140	1.34	0.0188
Vihanta vilja	0.0050	1.27	0.0064
Rypsi	0.0150	3.00	0.0450
Herne	0.0350	1.50	0.0525
Peruna	0.0110	0.40	0.0044
Sokerijuurikas	0.0230	0.20	0.0046
Apilan siemen	0.0480	1.30	0.0624
Vihannekset	0.0158	0.20	0.0032

Tähteiden määrä vaihtelee kuitenkin paljon olosuhteista, lajikkeista, viljelymaan ominaisuuksista ym. johtuen. Viljelijät voivat tarvittaessa määrittää viljakasvustojen satotähteiden typen laskentaan omat arvot. Sitä varten otetaan satokasvien maanpäällisistä osista näyte, josta erotellaan sato (jyvät) ja tähteet (korret ja lehdet). Erilleen otetut erät punnitaan, mitataan niiden kosteudet ja lasketaan niiden kuiva-ainemäärät.

Tähteiden typpi-sato-suhde ( $N'_{cr}$ ) lasketaan tämän jälkeen kuiva-ainemäärien ja esimerkiksi taulukossa 9 annetun tähteiden typpipitoisuuden avulla yhtälöstä

$$N'_{cr} = \frac{x_{N,cr} m_{cr}}{m_c}, \quad (6f)$$

missä  $x_{N,cr}$  on tähteiden typpipitoisuus taulukosta 9,  $m_{cr}$  on tähteiden kuiva-aine näytteessä ja  $m_c$  sadon (jyvien) kuiva-aine näytteessä.

**Biologisen typen sidonnan** maahan tuottamasta tyypestä ( $N_{bf}$ ) haihtuva  $N_2O$  lasketaan yhtälöstä

$$N_2O(N_{bf}) = \frac{M_{N_2O}}{M_N} a_{N_2O} N_{bf}, \quad (6g)$$

missä  $a_{N_2O} = 0.0125$  on  $N_2O$ :na haihtuvan typen osuus biologisen typen sidonnan tyypestä [9]. Typen sidonnan maahan tuottama typpivirta lasketaan yhtälöstä

$$N_{bf} = \sum_c (x_{N,cr} + N'_{cr}) m_c, \quad (6h)$$

missä  $x_{N,cr}$  ja  $N'_{cr}$  on tähteiden typpipitoisuus ja typpi-sato-suhde (kg N/kg KA sato) ja  $m_c$  kuiva-ainesato. Laskennassa huomioidaan vain tyypeä sitovien kasvien sadot (hernekasvit).

**Orgaanisilla viljelysmailla** (orgaanista ainetta yli 20 %) tapahtuvissa hiilivaraston muutoksissa syntyvän  $N_2O$  -päästön laskentakaava on

$$N_2O(A_{os}) = \frac{M_{N_2O}}{M_N} a_{N_2O} A_{os}, \quad (6i)$$

missä  $A_{os}$  on kasvulohkon ala ja  $a_{N_2O}$  on 11.7 kg  $N_2O$ -N/ha/a yksivuotisille viljelykasveille ja 4.0 kg  $N_2O$ -N/ha/v nurmelle [9].

**Kivennäismailla tapahtuvan orgaanisen maa-aineksen mineralisoitumisen** tuottamasta tyypestä syntyvää  $N_2O$  – päästöä ei tarkastella nykyisissä kasvihuonekaasuinventaariorissa eikä siis myöskään tässä kasvulohkon mallissa.

#### • $CO_2$ -päästöt ilmaan

**Karbonaatteja sisältävien kalkitusaineiden** käytöstä syntyvät  $CO_2$  – päästöt kohdistetaan kasvihuonekaasuinventaariorissa ostovuoteen, joka samalla on siis käyttövuosi. Lohkomallissa tämä kohdistustapa aiheuttaisi  $CO_2$  -päästöille epäjatkuvan aikasarjan, jossa kalkitusvuosien päästöt olisivat suuret ja välivuosina, jolloin ei kalkita, päästöjä ei olisi lainkaan. Kalkin neutralointivaikutus ei kuitenkaan pääty ensimmäiseen vuoteen, vaan jatkuu seuraavina välivuosina. Tässä mallissa, kuten monessa muussakin elinkaarimallissa, neutralointivaikutus jaetaan tasaisesti kaikille kalkituskierron vuosille.  $CO_2$  -päästöt lasketaan vastaavasti tasaisesti jaetuista kalkitusainevirroista yhtälöllä

$$CO_2(\mathbf{IO}) = \frac{M_{CO_2}}{M_C} \sum_{i,t'} x_C IO_{i,t'} / T_i, \quad t - t' \leq T_i, \quad (7a)$$

missä  $IO_{i,t'}$  on sellainen karbonaatteja sisältävä kalkitusainepanos kasvulohkolle vuonna  $t'$ , jonka levityksestä tarkasteluvuonna kulunut aika,  $t$  on enintään tähän aineeseen tilalla sovellettava rotaatioaika,  $T_i$ .  $M_C$  ja  $M_{CO_2}$  ovat hiilen ja hiilidioksidin moolipainot ja  $x_C$  kalkitusainepanoksen hiilipitoisuus, joka on puhtaalle kalsiumkarbonaatille (kalkki) 12 % ja vastaavasti kalsiummagnesiumkarbonaatille (dolomiitti) 13 %. IPCC:n ohjeissa [10] tyypillinen kalkkipanos on 5 tn/ha ja rotaatioaika 5 vuotta.

**Puhtaan urean lannoitekäytöstä aiheutuvat  $CO_2$  – päästöt** ovat 0.73 kg  $CO_2$ /kg Urea. Ureaa käytetään lannoitukseen pääasiassa muualla kuin peltoviljelyssä [7].

**Maan orgaanisen hiilivaraston muutoksesta johtuvia hiilidioksidipäästöjä** ei ole huomioitu elinkaariarvioinneissa, sillä niiden arvioimiseksi ei ole ollut käytännössä saatavilla LCA -mallinnukseen käypää dataa. Maan hiilitaseeseen vaikuttavien tekijöiden, kuten paikallisten olosuhteiden, maan laadun, vesitalouden, viljelykäytäntöjen ja -menetelmien ym., vaikutusmekanismeja ei tunneta tilakohtaisen elinkaarihallinnuksen vaatimalla tasolla. Tämän vuoksi niitä ei huomioida tämän mallin tämänhetkisessä versiossa. Hankkeessa arvioitiin kuitenkin maan orgaanisen hiilivaraston mallinnuksen nykytilaa. Siitä lyhyt katsaus seuraavassa.

Bioenergian raaka-aineiden, erityisesti palmuöljyn ympärillä on herännyt paljon keskustelua hiilivarastojen merkityksestä bioenergiaketjujen ilmastomuutosvaikutuksessa. Tämä on saanut merkittävät energia-alan toimijat, kuten IEA:n (IEA Bioenergy–kansainvälinen tutkimusyhteistyöfoorumi) tarttumaan asiaan ja teettämään tutkimuksia, joissa kysymystä on tarkasteltu. Bioenergian alueelta onkin viime vuosina julkaistu tutkimuksia, joissa maan hiilivaraston muutokset on huomioitu, esimerkkinä Brandão, et al., 2010 [11] ja Bird et al., 2011 [11]. Hiilivarastojen huomiointi elinkaariarvioinnissa on kuitenkin vielä kehitysasteella, ja ainakin osittain tästä syystä arviointimenetelmät vaihtelevat tutkimuksesta toiseen. Eroja aiheuttaa lisäksi se, että hiilivaraston muutosta koskevat lähtötiedot, kuten myös tutkimusten tulokset, kiinnittyvät yleensä hyvin erityisiin ja erilaisiin olosuhteisiin ja viljelykäytäntöihin. Lähtötietoja ja tuloksia ei voi suoraan soveltaa muualle. Esimerkiksi Brandãon tutkimuksessa käytettiin orgaanisen hiilen koskemattoman maan referenssiarvona 150 t C/ha. Suomen kasvihuonekaasuinventaariossa käytetään vastaavana referenssinä hiekkamaille 71 t C/ha ja savimaille 95 t C/ha.

Kansallisissa kasvihuonekaasuinventaariorissa hiilivarastojen muutos on otettu huomioon jo melko pitkään, ja herää kysymys voitaisiinko niissä käytettyjä menetelmiä soveltaa kasvulohkon malliin. Kansallisissa malleissa käytetyt menetelmät eivät kuitenkaan sovellu lohkotason mallinnukseen, koska niiden spatiaalinen ja systemaattinen tarkkuus on liian karkeasta. Mallinnuslogiikkansa puolesta ne saattaisivat olla hyvinkin sopivia. Taulukkoon 10 on koottu Suomen KHK -arviossa [9] käytetyllä menetelmällä lasketut orgaanisen hiilen varastojen muutosvauhdit hiekkamaille eri maankäyttötilojen välillä, jotka kuvaavat siis hiilivaraston muutosvastetta niissä tapauksissa, että maankäyttötila muuttuu riviotsakkeen tilasta (Alkutilanne) sarakeotsakkeen tilaksi (Lopputilanne). Maankäytön muuttuessa esimerkiksi jatkuvasta kynnöstä tavanomaisessa viljelyssä lannoitetun nurmen viljelyyn, on orgaanisen hiilivaraston arvioitu muutosvauhti +1527 kg C/ha, v, mikä vatsaa -5599 kg  $CO_2$  – päästöä vuodessa hehtaarilta siihen asti, kunnes stationääritila saavutetaan tai maankäyttötila uudelleen muuttuu. Brandãon tutkimuksessa hieman samantapaiselle maankäytön muutokselle, siirtymisessä tyypillisestä viljelystä monivuotisen elefanttiruohon kasvatukseen, hiilivaraston muutosvaste on noin +620 kg C/ha, v.

Lohkomallinnuksen kohdentumisvaatimuksia vastaavien, kvantitatiivisten tietojen hankinta maan hiilivaraston muutoksista on hyvin työlästä johtuen muutosprosessien ominaisuuksien suurista

vaihteluista eri yhteyksissä. Menetelmälliset ja tekniset valmiudet tietojen hankkimiseksi olisivat pitkälti olemassa, mutta tiedonkeruun korkeat kustannukset tekevät sen toteuttamisen käytännössä mahdottomaksi. Mallinnus voisi olla edullinen ratkaisu ongelmaan. Sekin vaatii kalibrointeja ja ylläpitoa varten mitattuja tietoja, mutta oletettavasti päästäisiin paljon vähemmällä työllä, kuin mitä maankäytön muutostilat kattava tietojen keruu merkitsisi.

Suomen kasvihuonekaasuinventaarion teossa käytetään metsämaan käytön orgaanisen hiilivaraston muutoksia laskeva Yasso07 – malli [13], jota ollaan ottamassa käyttöön myös viljelysmaiden hiilivarastojen muutosten laskentaan. Tästä voitaisiin lähitulevaisuudessa mahdollisesti saada työkalu myös lohkokohtaisten maankäytön muutosten vaikutusten arviointiin. Muita vastaavia vanhempia malleja ovat RothC [14] ja vapaasti saatavilla oleva kaikki maankäytön muodot kattava FullCAM [15], jossa viljelysmaiden laskentaan käytetään RothC mallia.

**Taulukko 10.** Maan hiilivaraston muutokset hiekkamailla ( $\Delta C$ , kg C/ha, v) maankäytön ja toimintatapojen muutosten (Alkutilanne  $\rightarrow$  Lopputilanne) seurauksena Suomen kansallisessa kasvihuonekaasuinventaariorissa käytetyllä menetelmällä [9] laskettuna.

		Lopputilanne						
		Kyntö, tavanomainen	Kevyt muokkaus	Kesanto	Suorakylvö	Kyntö, luomu	Nurmi, lannoittamaton	Nurmi, lannoitettu
Alkutilanne	Kyntö, tavanomainen	0	227	391	403	958	1030	1527
	Kevyt muokkaus	-227	0	164	176	731	803	1300
	Kesanto	-391	-164	0	13	567	639	1136
	Suorakylvö	-403	-176	-13	0	555	626	1123
	Kyntö, luomu	-958	-731	-567	-555	0	72	569
	Nurmi, lannoittamaton	-1030	-803	-639	-626	-72	0	497
	Nurmi, lannoitettu	-1527	-1300	-1136	-1123	-569	-497	0

#### • Ravinnehuuhtoumat

Tässä vaiheessa mallissa käytetään typpihuuhtouman arviointiin typpitaseeseen nojautuvia, tilastollisesti johdettuja yhtälöitä. Fosforihuuhtouman arviointiin käytetään vastaavasti tilastollisesti johdettuja yhtälöitä, joissa huuhtouma määräytyy maan liukoisen ja kokonaisfosforin arvoista. Nykyiset laskentamallit on dokumentoitu viitteessä [16]. Seuraavan sukupolven mallissa tilastolliset funktiot on korvattu valuma-alueille kehitetyllä lohkosovelluksella, joiden sovellettavuutta tutkittiin tässä hankkeessa.

#### 4.1.5. Tuotantolinjamallit

Tuotantolinjat ovat viljelyinstanssien aggregaatteja, tuotantolinjainstansseja, joiden viljelyinstansseja yhdistää sama viljelyvuosi ja tuote, joka on tuotantolinjan päätuote. Tuotantolinjoihin aggregoituvat myös niihin kohdistetut yleistävät, jotka eivät siis kohdennu mihinkään yksittäiseen lohkoon. Tällaisia tehtäviä voivat olla esimerkiksi viljan kunnostukset myyntiä varten, myyntikuljetukset sekä lannoitteiden, siementen, kasvinsuojeluaineiden ym. viljelyssä käytettävien panosten hankintakuljetukset. Tuotantolinjainstanssin relaatiomalli ilmenee kuvasta 9.

Tilalla voi tiettyinä viljelyvuonna muodostua esimerkiksi mallasohran, rehuohran ja elintarvikevehnän tuotantolinjat. Päätuotteiden luokittelu on vapaata, tarpeen mukaan. Rajoittavana periaatteena on

kuitenkin se, että viljely- ja tehtäväinstansseja ei jaeta eri tuotantolinjainstanssien kesken, toisin sanoen tuotantolinjainstanssit muodostuvat kokonaisista viljely- ja tehtäväinstansseista.

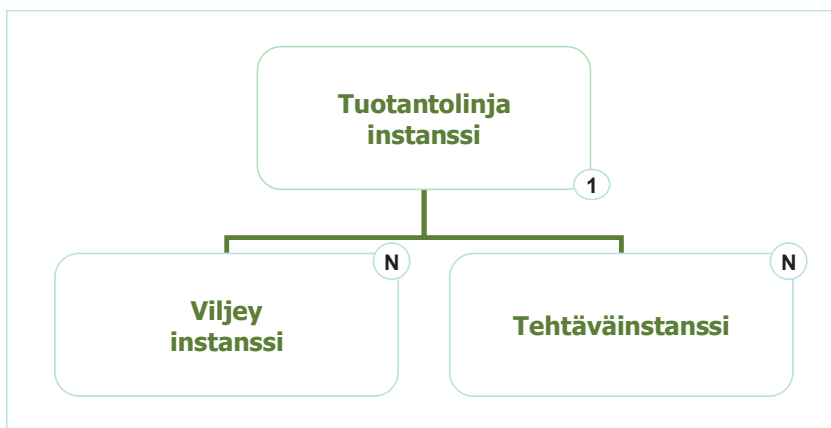
### ***Viljely- ja tehtäväinstansseilta periytyvät panos- ja tuotosvirrat***

Tuotantolinjainstanssi perii viljely- ja tehtäväinstanssiensa panos- ja tuotosvirrat, jotka integroidaan nimikkeittäin yhtälön:

$$IO_i = \sum_j IO_{i,j} + \sum_k IO_{i,k} \quad (10)$$

mukaan, missä  $IO_{i,j}$  on virta ( $i$ ) viljelyinstanssissa ( $j$ ) ja  $IO_{i,k}$  sama virta tehtäväinstanssissa ( $k$ ).

Tuotosvirrat sisältävät kaikki sisään- ja ulosvirtaukset sekä viljely- että tehtäväinstansseista, siis myös päästöt.



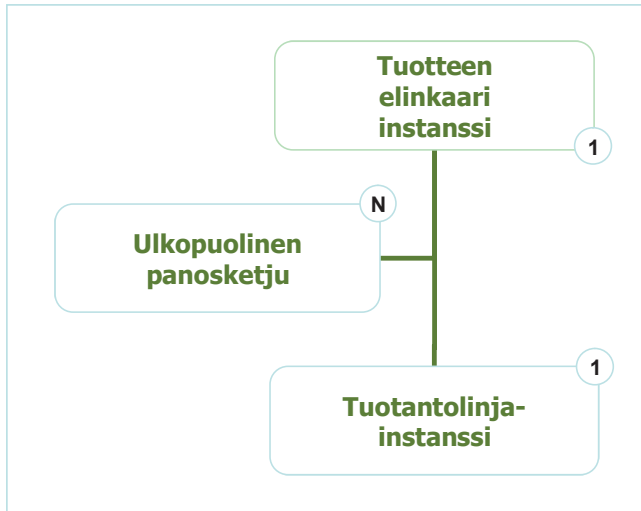
**Kuva 9.** Tuotantolinjainstanssin relaatiomalli. Relaatiotyyppit on merkitty muuttujia kuvaavien laatikoiden vastakkain oleviin kulmiin. 1-N – relaatio on yksi moneen.

#### **4.1.6. Tuotteiden elinkaarimallit**

Tuotteiden elinkaarimallit edustavat mallihierarkian korkeinta tasoa tilalla. Ne ovat tiettyyn päätuotteeseen ja viljelyvuoteen kiinnittyviä instansseja, joista kukin muodostetaan päätuotteensa tuotantolinjainstanssista ja ulkopuolisten panosketjujen malleista. Tuotteen elinkaari-instanssin relaatiomalli ilmenee kuvasta 9.

Tuotteiden elinkaarimallit ovat 'kehdosta portille' ulottuvia malleja. Ne kuvaavat päätuotteen elinkaaresta sen osan, joka alkaa luonnon raaka-aineista ja päättyy tilan portille tai, jos viljelijä kuljettaa tuotteen itse asiakkaalle, asiakkaan vastaanottopisteeseen. Viljelijä ei toimita päätepisteen jälkeen enää mitään tuotteeseen liittyviä tehtäviä. Tuotteen elinkaari jatkuu siitä eteenpäin muiden toimijoiden piirissä.





**Kuva 10.** Tuotteen elinkaari-instanssin relaatiomalli. Relaatiotyypit on merkitty muuttujia kuvaavien laatikoiden vastakkain oleviin kulmiin. 1-N-relaatio on yksi moneen, 1-1 yksi yhteen.

Elinkaarimalliin liittyvät ulkopuolisten panosketjujen mallit ovat yleisistä elinkaaritiedoista kokoonpantuja ulkopuolelta hankittujen panosten kehdosta tilalle ulottuvia elinkaarimalleja. Toisin kuin tuotantolinjat, ne eivät ole instansseja, sillä ne eivät kiinnity viljelyvuoteen kuten tuotantolinjat, joiden instanssit ovat erilaisia eri vuosille. Ulkopuolisten panosketjujen malleja voidaan käyttää useampana vuonna ja useammalle päätuotteelle, koska ne eivät ole päätuotteesta riippuvaisia. Jokainen niistä sisältää kaikki olennaiset prosessit päätuotteensa elinkaareissa, sen matkalla luonnon raaka-aineista viljelijän portille.

#### *Tuotantolinjainstansseilta ja ulkopuolisilta panosketjuilta periytyvät panos- ja tuotosvirrat*

Tuotteen elinkaari-instanssi perii suoraan tuotantolinjainstanssinsa panos- ja tuotosvirrat. Ne virrat näistä, jotka ovat tilan ulkopuolelta hankittavia välituotteita tai ulkopuolelle käsiteltäviksi meneviä jätteitä laajennetaan ulkopuolisiksi panosketjuiksi. Tuotantolinjassa syntyneitä, hyötykäyttöön meneviä sivuvirtoja ei laajenneta, vaan ne kirjataan päätuotteen sivuvirroiksi, joiden käsittelyt, päätuotevirran tapaan, rajataan tilan systeemien ulkopuolelle, hyödyntävän systeemin piiriin kuuluviksi. Laajennuksen yleinen relaatio on

$$\mathbf{IO}_j^B = B(\mathbf{F}_j(\mathbf{IO}_j)), \quad (11)$$

missä  $\mathbf{IO}_j^B$  on tuotantolinjainstanssin panoksesta (tai tuotoksesta)  $\mathbf{IO}_j$  sitä tuottavassa (tai käsittelevässä) ulkoisessa panosketjussa syntyneiden reunavirtojen vektori, joka saadaan panosketjun systeemin ratkaisusta  $\mathbf{F}_j(\mathbf{IO}_j)$  reunaehdolla  $\mathbf{IO}_j$  summaamalla kaikkien systeemiin kuuluvien prosessien reunavektoreista (reunavirtaoperaattori  $B$ ). Esimerkiksi  $\text{CO}_2$  -päästöjä, joka on yksi reunavirtavektorin muuttuja, syntyy tavallisesti useammassa kuin yhdessä panosketjun malliin sisältyvässä prosessissa.

Ulkopuolisilta panosketjuilta periytyvät niihin sisään virtaavat panosvirrat, jotka ovat pääasiassa luonnon raaka-aineita ja primäärienergiaa, sekä niistä ulosvirtaavat päästöt, sivuvirrat ja jätteet. Näistä muodostuu yhdessä tuotantolinjainstanssin reunavirtojen kanssa tuotteen elinkaari-instanssin panokset ja tuotokset yhtälön

$$\mathbf{IO}_i = \mathbf{IO}_i + \sum_j \mathbf{IO}_{j,i}^C \mid i \notin \{j\} \quad (12)$$

mukaan. Elinkaari-instanssista jäävät siis pois panosketjuiksi laajennetut tuotantolinjainstanssin panosvirrat ja niitä vastaavat panosketjujen tuotosvirrat, koska laajennuksessa nämä muuttuvat elinkaari-instanssin sisäisiksi virroiksi.

## **4.2. Lohkokohtaisten ravinnehuuhtoumamallien kehittäminen ja pilotointi**

Osatehtävässä sovellettiin valuma-alueen ravinnevirtojen mallinnuksessa käytettyjä INCA-N [28], [29], [30] ja INCA-P -mallien [31] lohkolta huuhtoutuvien ravinnevirtojen laskentaan. Menetelmänä oli kalibroida mallit vertaamalla niiden antamia estimaatteja mitattuihin valumiin ja niiden ravinnepitoisuuksiin. Estimaatit ja mittaukset ovat kummatkin useiden muuttujien pitkiä aikasarjoja. Kalibrointiin tehtävät muutokset tehtiin päättelemällä aikaisemmilla kalibroinneilla laskettujen estimaattien ja mittausten poikkeamista muodostuvan sarjan trendeistä, mitä parametrejä kannattaa muuttaa ja kuinka paljon. Muutoksilla pyrittiin aina pienentämään poikkeamia. Kalibroinnin katsottiin olevan optimaalinen, kun enää ei löydetty uutta kalibrointia, joka olisi pienentänyt poikkeamia. Lisäksi katsottiin, että mallin tulee tuottaa havaintojen mukainen ravinnepitoisuuden taso ja vuodenaikaisvaihtelu ojavedessä.

INCA-N ja INCA-P mallit ovat dynaamisia, prosessipohjaisia valuma-alueille. Malleissa laskentayksikkö on ns. Hydrologically Representative Unit (HRU). Näissä perusyksiköissä lasketaan ravinnevirtojen muodostuminen maa-alueilla ja kulkeutuminen jokeen. Lisäksi lasketaan kulkeutumis- ja muutuntaprosessit joessa purkupisteeseen. Typen prosessit kuvataan ensimmäisen kertaluokan hajoamisyyhtälöillä ja fosforin prosessit tasapainoreaktioilla. Tässä sovelluksessa mallit kalibroitiin ojavedessä mitattuihin ravinnepitoisuuksiin. Peltolohkot jaettiin useampaan laskentayksikköön kaltevuuden ja maan kemiallisten ominaisuuksien perusteella. Lisäksi mallinnettuja kasvin ravinteiden ottoja ja pelloilta tapahtuvaa huuhtoumaa verrattiin Kotkanojan koekentän tuloksiin.

Kalibroinnissa käytettiin MTT:n Hovin lohkon valuma-alueelta mitattuja aikasarjoja, sekä sille vanhojen viljelysuunnitelmien, viljelykokeiden ja satoseurantatietojen perusteella muodostettua viljelyhistoriaa. Valuma-alue on lähelle yhtenevä Hovin Pelto nimisen rekisterilohkon kanssa. Lohkoilta tarvittiin tiedot viljelykasveista, satotasoista, muokkausmenetelmistä, kylvön ja sadonkorjuun ajankohdasta sekä lannoitustasoista. Lisäksi tarvittiin tiedot lohkojen kaltevuudesta ja maan kemiallista ja fysikaalisista ominaisuuksista (mm. maalaji, rakeisuusjakauma ja maan P-luku).

## **4.3. Mitattuihin tietoihin nojautuvan karjamallin kehittäminen ja pilotointi**

Tässä osatehtävässä kehitettiin lypsykarjan hierarkkinen tiedonhallintamalli tiloille. Osatehtävässä käytetty päämenetelmä on sama kuin kasvintuotannon mallinnuksessa, eli relaatiomallinnus, jota tässä sovelletaan eläimen elinkaaren mallinnukseen eri hierarkian tasoilla. Hierarkiatasot on tässä rajattu kolmeen, jotka ovat alimmasta ylimpään: eläimen perustoiminto-, eläin- ja karjataso.

Perustoimintotaso vastaa kasvintuotannon tehtävätasoa, eläintaso lohkotasoa ja karjataso tuotantolinjatasoa. Tuotetasoa ei tässä yhteydessä tarkastella. Se liitetään mukaan myöhemmin, samaan tapaan kuin kasvintuotannon mallien yhteydessä edellä kuvattiin. Perustoimintojen ja eläimen relaatiot perustuvat metabolisoituvan entalpian käytön ja hankinnan tasapainoon.

### **4.3.1. Mallien tavoitteet ja systeemien rajaukset**

Mallien tavoitteena on kuvata lypsykarjaan lukeutuvien eläinten panos- ja tuotosvirrat toiminnallisen hierarkian eri tasoilla. Eläimen perustoimintojen panokset ovat rehut ja vesi. Tuotokset ovat maito, eläin itse ja jälkeläiset sekä sonta, virtsa ja metaanipäästö ilmaan. Typpi ja fosfori ovat sontaan ja virtsaan sisältyvät tuotokset.

Eläinyksilön elinkaaren katsotaan alkavan emän munasolun hedelmöitymisestä ja päättyvän siihen, kun eläin poistuu tilalta. Elinkaaren aikajanana nollapiste on eläimen syntymähetki. Eläin liittyy karjaan elinkaaren alkupisteessä, joka aikajanalla on kohdassa  $t = -\tau$ , missä  $\tau$  on emän raskausajan kesto. Syntyessään eläimellä on sikiövaiheesta emän kautta kertyneet panokset ja tuotokset, jotka on vastaavasti vähennetty emän panoksista ja tuotoksista. Toiselta tilalta tuleva eläin liittyy uuden tilansa karjaan tulohetkellään. Tällöin se tuo mukanaan tulohetkeen mennessä kertyneet kasvun panokset ja tuotokset.

Mallit kiinnittyvät todellisuuteen mittausjärjestelmillä kerätyillä aikasarjoilla, joita hyödyntäen muodostetaan perustoimintojen panosten ja tuotosten kuvaukset ja näistä edelleen vastaavat kuvaukset ylemmille mallihierarkian tasoille.

Tällä hetkellä lypsykarjataloudessa käytettävät ruokinta- ja lypsyjärjestelmät mittaavat automaattisesti useita asioita. Järjestelmien yhteen toimiminen mallinnuksen kanssa siten, että niiden keräämien tietojen muodot ja sisällöt kohtaisivat mallinnuksen tarpeet ja että mittaustiedot siirtyisivät vaivattomasti mallinnuksen käyttöön, on kuitenkin vasta tulevaisuuden visio. Vision toteutuminen edellyttää uusien teknologioiden ja tiedonhallinnan ja siirron menetelmien kehittämistä ruokinta- ja lypsyjärjestelmiin niin pitkälle, että erilaisten rehujen syöntimäärät ja tuotetun maidon määrät voitaisiin mitata eläinkohtaisesti ja siirtää mallinnuksen käyttöön. Tästä ei olisi hyötyä vaan ympäristömallinnukselle, vaan myös esimerkiksi tuotannon ohjauksessa ja optimoinnissa, missä mittaustietoja voitaisiin käyttää apuna uudella tavalla. Tässä hankkeessa mitatut tiedot kaivettiin esiin MTT:n Maaninnan koetilalla tehtyjen ruokintakokeiden arkistoista ja siirrettiin mallinnuksen käyttöön puhtaasti 'hartiavoimin', mikä ei luonnollisestikaan voi olla mallien toimintatapa tuotantokäytössä.

Mallien systeimirajat muodostuvat tässä tapauksessa eläinyksilöiden elinkaarista lähtien kaikilla mallihierarkian tasoilla. Perustoiminnot kiinnittyvät luonnollisesti suoraan eläimen elinkaareen sekä ajallisesti että paikallisesti. Karjan elinkaari on unioni eläinyksilöiden elinkaarista, johon siis määritelmän mukaan sisältyy tilalla tietyllä hetkellä elossa olevat eläimet. Sikiövaiheessa olevat eläimet liittyvät karjan elinkaareen syntymässään. Ajallisesti karjan elinkaari alkaa ensimmäisen eläimen tulosta tilalle, jatkuu siitä eteenpäin niin kauan kuin tilalla on elossa olevia eläimiä ja päättyy viimeisen eläimen poistumiseen tilalta. Karjan elinkaaren alueellinen raja, jonka sisälle kuuluvat esimerkiksi laitumet, on vastaavasti eläinten elinkaariin eri ajankohtina liittyneiden alueiden unionin raja.

### 4.3.2. Perustoimintojen mallit

Eläimen perustoiminnot käsittävät sikiön kehittymisen, kasvun, painon vaihtelun, maidon muodostumisen sekä elintoimintojen ja aktiviteettien ylläpidon, joista yhdessä muodostuu energian ja ravinteiden käyttö, sekä näitä palvelevan energian ja ravinteiden hankinnan.

Käytön toiminnot oletetaan keskenään riippumattomiksi. Käyttö ja hankinta riippuvat toisistaan entalpiataseen kautta, siten että metabolisoituvan entalpian hankinta on joka hetki yhtä suuri kuin sen käyttö. Perustoiminnot käyttävät energian lisäksi typpeä, fosforia ja muita ravinteita, jotka eläin ottaa syömistään ravintoaineista. Vettä eläin käyttää maidon muodostukseen sekä virtsan ja sonnan muodostukseen. Uutta vettä tarvitaan lisäksi hikoilussa ja hengityksessä höyrystyvän veden tilalle sekä korvaamaan kudoksiin varastoituvaa vettä.

Perustoimintojen tila muuttuu jatkuvasti eläimen elinkaaren alusta sen loppuun saakka. Mallissa tila kuvataan entalpian ja aineen sisään- ja ulosvirtauksina sekä varastoitumisena eläimeen. Seuraavassa tarkastellaan näitä tilan tekijöitä perustoiminnoittain yleisessä kohdassa  $t$  (aika elinkaaren alusta)

eläimen elinkaarta. Liikkeelle lähdetään perustoimintojen käyttämistä entalpiavirroista, jotka mallissa muodostavat käytön ja hankinnan välisen perusrelaation, josta seuraavat eri aineiden taseet, mukaan lukien vesi, jonka tarve on seurausta pääasiassa tarpeesta laimentaa sulamaton kuiva-aine ja ravinneylijäämät poistoa varten. Entalpien jälkeen kuvataan typen ja fosforin käytön mallit ja lopuksi energian ja ravinteiden hankinnan mallit, joihin sisältyvät entalpia-, typpi-, fosfori- ja vesitaseen osamallit ja metaanipäästön malli.

### **Entalpien käyttö**

Entalpien bruttotarve  $\dot{H}_{me,i}$  toiminnossa ( $i$ ) määritellään nettotarpeen  $\dot{H}_{net,i}$  ja hyötysuhteen  $\eta_i$  avulla yhtälöstä

$$\dot{H}_{me,i} = \frac{\dot{H}_{net,i}}{\eta_i} \quad (13)$$

Bruttotarpeiden summa on se entalpiavirta, joka solumetaboliaan pitää imeytyä ruoansulatuksesta, jotta perustoimintojen tarpeet tyydyttyvät, alias metabolisoituvan energian virta,

$$\dot{H}_{me} = \sum_i \dot{H}_{me,i} = \sum_i \frac{\dot{H}_{net,i}}{\eta_i} \quad (14)$$

Useiden toimintojen hyötysuhteiden yhtälöissä esiintyy muuttujana eläimeen sisään virtaavan rehumassan metabolisoituvan entalpien ja palamisentalpien suhde

$$q = \frac{\dot{H}_{me}}{\dot{H}_{br}} \quad (15)$$

Seuraavassa kuvataan perustehtävien nettoentalpien tarpeiden ja hyötysuhteiden mallit.

- **Sikiön kehittyminen**

Sikiön ( $i=f$ , Foetus) kehittymisen nettoentalpien tarve  $\dot{H}_{net,f}$  lasketaan yhtälöstä

$$\dot{H}_{net,f} = \dot{m}_f h_f, \quad (16)$$

missä  $\dot{m}_f$  on sikiön kasvun massavirta ja  $h_f$  sen ominaisentalpia

Sikiön kasvun massavirran kuvaukseen käytetään AFRC:n energian tarpeen yhtälöistä [17] johdettua yhtälöä

$$\dot{m}_f = \frac{a}{\tau} \varepsilon^\xi e^{\gamma(\xi)} m_C, \text{ missä} \quad (17)$$

$\xi = \frac{t}{\tau}$  on suhteellinen aika raskauden alusta,  $\tau$  on raskauden kesto,  $m_C$  vasikan syntymäpaino,

[  $a = 5.611205$ ,  $\varepsilon = 0.984058$ ,  $\gamma(\xi) = b\varepsilon(1 - \varepsilon^{\xi-1})$ , jossa  $b = 349.164$ .

Ominaisentalpiana käytetään raskausajan keskiarvoa,

$$h_f = \frac{1}{m_C} \int_0^{\tau} \dot{m}(t) h_f(t) dt = \text{vakio} = 6.92 \text{ MJ/kg}, \quad (18)$$

missä entalpiakertymä  $\int_0^{\tau} \dot{m}(t) h_f(t) dt$  on laskettu AFRC:n antamasta entalpian kertymän yhtälöstä [17] raskausajan pituudella 279 päivää. Syntymäpaino on AFRC:n oletettava 40 kg. Entalpian käytön hyötysuhde on sikiön kehittämisessä vakio [17],

$$\eta_f = 0.133. \quad (19)$$

### • Kasvu

Kasvun mallintamiseen käytetään mitattuun kasvuun sovitettua Richardsin kasvuyhtälöä [18]

$$m(t) = A(1 - be^{-kt})^M \quad (20)$$

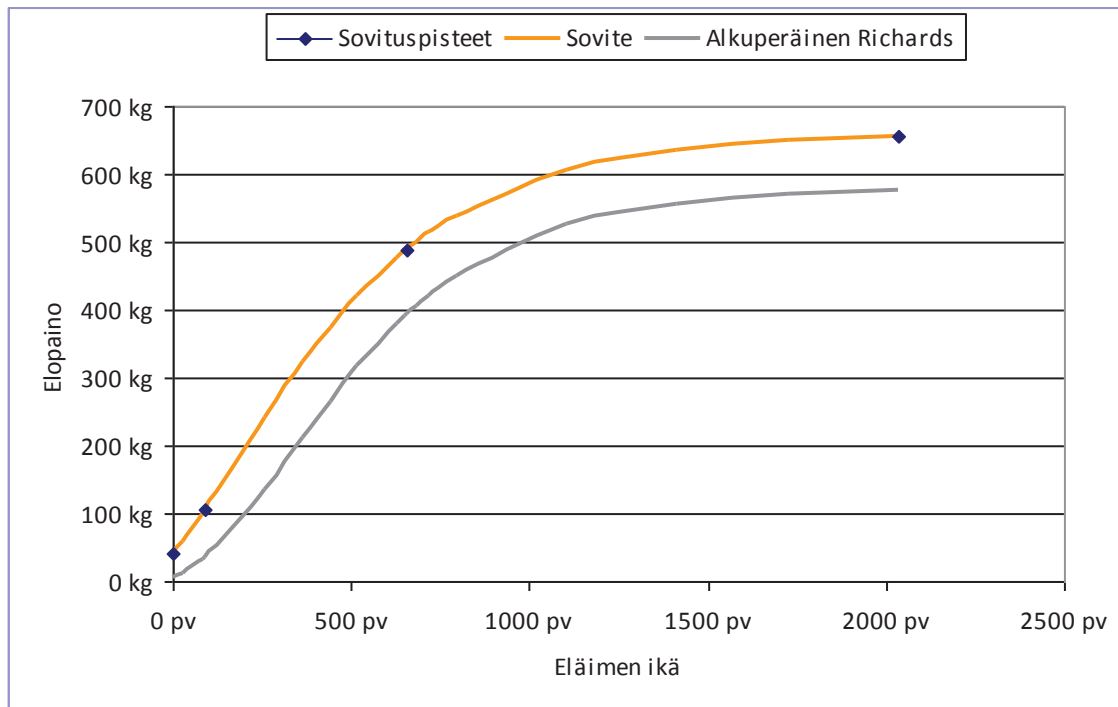
Missä  $A$ ,  $b$ ,  $k$  ja  $M$  ovat sovitettuja Richardsin yhtälön vakioita. Yhtälö kuvaa eläimen painon iän funktiona. Alkuperäiset vakiot ilmenevät taulukosta 11. Sovitukseen käytetään mitattuja painoja yhdestä neljään pisteessä eläimen elinkaarta, mittaustietojen saatavuudesta riippuen. Loput sovituspisteet generoidaan niin, että sovituspisteitä on aina neljä, joista ensimmäinen edustaa eläimen syntymäpainoa ja viimeinen eläimen painoa täysikasvuisena. Sovituskertoimet  $\alpha, \beta, \lambda$  ja  $\mu$  saadaan ehdosta

$$m(t_i) = \alpha A(1 - \beta b e^{-\lambda k t_i})^{\mu M} = m_i + \delta_i \ni |\delta_i| = \min! \quad \forall i \in \{1, 2, 3, 4\} \quad (21)$$

Yhtälöryhmän ratkaisu on iteratiivinen. Kuvassa 11 on esimerkki kasvufunktion sovitteesta.

**Taulukko 11.** Richardsin yhtälön keskimääräiset parametrit lypsylehmille [19].

A, kg	B	k, pv <sup>-1</sup>	M
578.8074	0.6807	0.0030	3.8901



**Kuva 11.** Esimerkki kasvufunktion sovitteesta..

Kasvun massavirta on

$$\dot{m}_g = \frac{dm}{dt} = kMm(t) \left[ \left( \frac{A}{m(t)} \right)^{1/M} - 1 \right] \quad (22)$$

Kasvun ( $i=g$ , Growth) nettoentalpian tarve  $\dot{H}_{net,g}$  lasketaan yhtälöstä

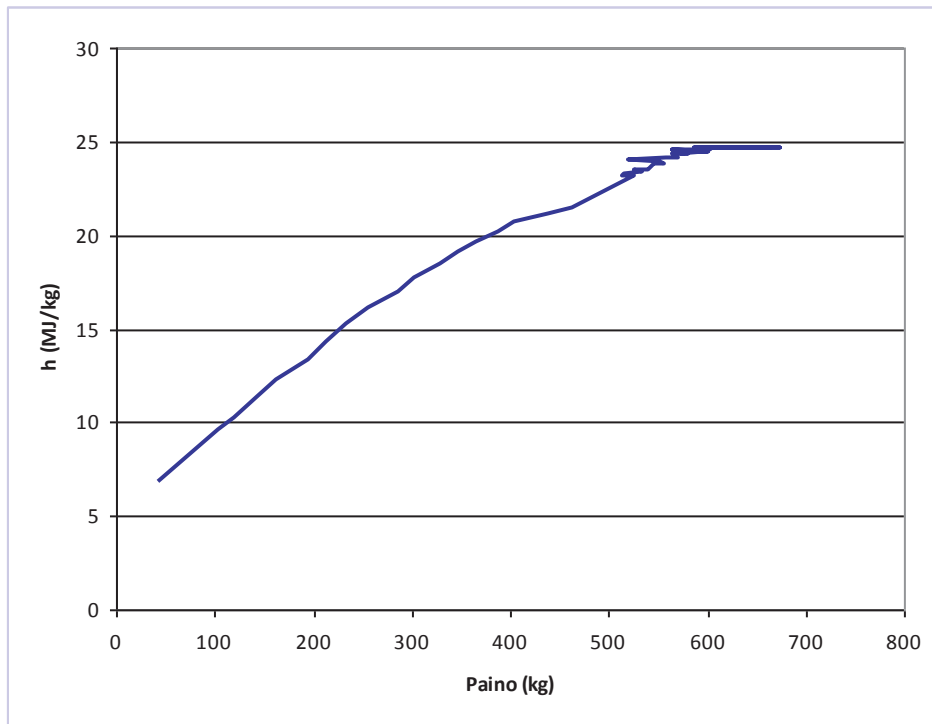
$$\dot{H}_{net,g} = \dot{m}_g h_g \quad (23)$$

johon kasvun ominaisentalpia,  $h_g$  (MJ/kg (elopainon lisäystä) saadaan yhtälöstä [17]

$$h_g = h(m(t)) = c_2 \frac{4.1 + 0.0332m(t) - 0.000009 m(t)^2}{1 - c_3 * 0.1475 * \dot{m}(t)} \quad (24)$$

Tässä  $c_2$  on kypsyysryhmästä (varhais-, keskimääräis- ja myöhäiskypsä, rotujen ryhmittely [17]) määräytyvä kerroin, joka on friisiläisrotuisille hiehoille arvoltaan 1 ja sonneille vastaavasti 0.75. Ayrshire –rotuisille AFRC:n taulukossa ei ole kypsyysryhmää. Niille käytetään mallissa keskimääräisesti kypsyvien rotujen arvoja: hiehot 1.15 ja sonnit 0.85.  $c_3$  on ruokintatason (suhteessa ylläpidon bruttoentalpian tarpeeseen) huomioiva kerroin, jonka arvo on 1, kun ruokintataso  $>1$ , ja 0, kun ruokintataso  $\leq 1$ . Käytännössä  $c_3$  on aina arvoltaan 1. Kuva 12 esittää yhtälöllä 24 lasketun ominaisentalpian kulkua eläimen painon funktiona.





**Kuva 12.** Ominaisentalpian riippuvuus eläimen painosta. Holsteinrotuinen hieho (MTT Maaninka ID 54). Painot ovat mitattuja, mikä aiheuttaa lähellä täysikasvuuspainoa ilmenevän kohinan.

Kasvun entalpiakäytön hyötysuhde lasketaan yhtälöstä [17]

$$\eta_g = \begin{cases} 0.78q + 0.006, & \text{hiehot ja sonnit} \\ 0.95(0.35q + 0.42), & \text{lypsävät} \end{cases} \quad (25)$$

### • Painon vaihtelu

Lehmän paino alkaa laskea synnytyksen jälkeen ja palaa yleensä ennalleen ennen seuraavaa poikimista. Tämä vaihtelu,  $m_L$  kuvataan yhtälöllä

$$m_L(t) = \hat{m}_L \mu(t) \varphi(t) \quad (26)$$

Funktio

$$\mu(t) = \frac{t}{\tau} e^{1 - \frac{t}{\tau}} \quad (27)$$

kuvaa painon muutoksen muodon, vakio  $\hat{m}_L \leq 0$  sen ääriarvon ja  $\tau$  tämän esiintymisajankohdan sekä muuttuja  $t$  poikimisesta kuluneen ajan [20] ja [21]. Muutos riippuu eläimestä. Oletusarvoina käytetään ensimmäiselle laktaatiokaudelle arvoja  $\hat{m} = -20\text{kg}$  ja  $\tau = 65\text{pv}$  ja toisesta kaudesta lähtien  $\hat{m} = -40\text{kg}$  ja  $\tau = 75\text{pv}$  [21].

$$\varphi(t) = 1 - \left(1 - e^{-kt}\right)^M \quad (28)$$

on alkuperäiseen kuvaukseen lisätty funktio, joka nopeuttaa painon palautumista mallissa ensimmäisen laktaatiokauden loppupuolella niin, että vajausta ei siirry seuraavalle kaudelle. Ensimmäisellä laktaatiokaudella  $k = 0.00909$  ja  $M = 9$ , toisesta kaudesta lähtien  $k = 0.01538$  ja  $M = 50$ .

Painon vaihtelun massavirran yhtälö on

$$\dot{m}_L(t) = \hat{m}_L(\dot{\mu}\varphi + \mu\dot{\varphi}), \quad (29)$$

$$\text{missä } \dot{\mu}(t) = \frac{1}{\tau} \left(1 - \frac{t}{\tau}\right) e^{\frac{1-t}{\tau}} \text{ ja} \quad (30)$$

$$\dot{\varphi}(t) = -kM \left[1 - e^{-kt}\right]^{M-1} e^{-kt}. \quad (31)$$

Painonvaihtelun ominaisentalpia on mallissa vakio [17],

$$h_L = 19 \text{ MJ/kg}. \quad (32)$$

Painon vaihtelun ( $i=L$ , Weight loss) nettoentalpian tarve  $\dot{H}_{net,L}$  lasketaan yhtälöstä

$$\dot{H}_{net,L} = \dot{m}_L h_L \quad (33)$$

Painon vaihtelun entalpiakäytön hyötysuhde määräytyy yhtälöstä [17]

$$\eta_{wx} = \begin{cases} 0.84 & \text{kudosentalpiasta hyötyentalpiaksi} \\ 0.95(0.35q + 0.42) & \text{metabolisoituvasta entalpiasta kudosentalpiaksi} \end{cases} \quad (34)$$

#### • Maidon muodostuminen

Maidon muodostumisen ( $i=milk$ , Milk) nettoentalpian tarve  $\dot{H}_{net,milk}$  lasketaan yhtälöstä

$$\dot{H}_{net,milk} = \dot{m}_{milk} h_{milk}, \quad (35)$$

missä  $\dot{m}_{milk}$  on raakamaidon muodostumisen massavirta ja  $h_{milk}$  ominaisentalpia.

Ominaisentalpia lasketaan yhtälöstä [17]

$$h_{milk} = c_{fat} h_{fat} + c_{prot} h_{prot} + c_{lact} h_{lact} + h_{corr}, \quad (36)$$

missä  $c_{fat}$ ,  $c_{prot}$  ja  $c_{lact}$  ovat raaka-maidon rasva-, proteiini- ja laktoosipitoisuudet (kg/kg maito) ja  $h_{fat}$ ,  $h_{prot}$ ,  $h_{lact}$ , vastaavat ominaisentalpiat, joiden arvot ovat 38.4 MJ/kg, 22.3 MJ/kg ja 19.9 MJ/kg.  $h_{corr}$  on korjaustermi, jonka arvo on -0.108 MJ/kg. Pitoisuudet perustuvat eläinkohtaisiin seurantamittauksiin, toisin sanoen ovat muuttujia.

Maidon massavirran arvot perustuvat kaikki päivittäisiin automaattisiin mittauksiin. Jos päivittäisiä mittausarvoja ei ole käytettävissä, mallinnetaan massavirta yhtälöllä [22]

$$\dot{m}_{milk} = \hat{m} \left(\frac{t}{\hat{\tau}}\right)^{f\hat{\tau}} e^{-f\hat{\tau}(\frac{t}{\hat{\tau}}-1)} \varphi(t_{Dry}) \quad (37)$$

Tässä  $\hat{m}$  on maidon muodostumisen maksimi massavirta (kg/pv) ja  $\hat{\tau}$  sen esiintymisen ajankohta (pv) laktaatiokauden alusta laskettuna.  $t$  on aika laktaatiokauden alusta,  $f = 0.0054 \text{ pv}^{-1}$  ja  $\varphi(t_{Dry})$  umpeen panon vaikutusta maidontuotantoon kuvaava funktio, jonka arvo on 1 laktaatiokauden alusta umpeen

panon aloitusajankohtaan,  $t_{Dry} - 20\text{pv}$  saakka, vähenee tämän jälkeen lineaarisesti arvoon 0 umpeen menon ajankohtaan,  $t_{Dry}$  tultaessa, ja pysyy sen jälkeen nollassa laktaatiokauden loppuun asti. Umpeen menon ajankohta riippuu eläimestä. Oletusarvona käytetään 306 pv laktaatiokauden alusta.

Maidon muodostumisen entalpian käytön hyötysuhde lasketaan yhtälöstä [17]

$$\eta_{milk} = 0.35 q + 0.42 \quad (38)$$

## • Ylläpito

Ylläpidon ( $i=mnt$ , Maintenance) nettoentalpian tarve  $\dot{H}_{net,mnt}$  lasketaan yhtälöstä [17]

$$\dot{H}_{net,mnt} = \dot{H}_{net,mnt,f} + \dot{H}_{net,mnt,a} \quad (39)$$

missä

$$\dot{H}_{net,mnt,f} = 0.53c_1(m/1.08)^{0.67} \quad (40)$$

on elintoimintojen ylläpidon nettoentalpiatarve ja

$$\dot{H}_{net,mnt,a} = \left( \sum_i h_{a,i}'' \dot{V}_{a,i} \right) m \quad (41)$$

aktiiviteettien ylläpidon nettoentalpiatarve. Kummassakin yhtälössä  $m$  on elopaino. Elintoimintojen ylläpidon yhtälössä vakion  $c_1$  arvo sonneille 1.15 ja muille eläimille 1. Aktiiviteetin yhtälössä  $\dot{V}_{a,i}$  on aktiiviteetin intensiteettiä ilmaiseva muuttuja ja  $h_{a,i}''$  aktiiviteetin ominaisentalpia. Ominaisentalpiat ilmenevät taulukosta 12 [17].

**Taulukko 12.** Aktiiviteettien ylläpidon ominaisentalpiat [17] .

Aktiiviteetti	$h''$	Yksikkö
Vaakasuora liike	2.6	J/kg,m
Pystysuora liike	28	J/kg,m
Seisaalla	417	J/kg,h
Asennon vaihto makuulta seisaalleen tai päinvastoin	260	J/kg,kpl

Ylläpidon entalpian käytön hyötysuhde lasketaan yhtälöstä [17]

$$\eta_{milk} = 0.35 q + 0.503 \quad (42)$$

## **Typen käyttö**

Malli laskee typen nettotarpeen sekä ylijäämän. Muita аспектеja, kuten metabolisoituvan proteiinin sisäänoton riittävyys, ei huomioida. Seuraavassa kuvataan siis perustehtävien nettoproteiinivirtojen,  $\dot{m}_{Pr,i}$  mallit. Vastaava typen massavirta,  $\dot{m}_{N,i}$  lasketaan nettoproteiinivirrasta kaavalla

$$\dot{m}_{N,i} = \dot{m}_{Pr,i} / 6.25 \quad (43)$$

- **Sikiön kehittyminen**

Sikiön kehittymisen nettoproteiinivirta  $\dot{m}_{Pr,f}$  (kg/ pv) lasketaan yhtälöstä

$$\dot{m}_{Pr,f} = \alpha e^{\beta(\xi)} m_C, \quad (44)$$

missä vakio  $\alpha = 0.00085925 \text{pv}^{-1}$ ,  $m_C$  vasikan syntymäpaino ja funktio

$$\beta(\xi) = 8.535683 - 0.73098\xi - 13.12013e^{\beta(-0.73098\xi)}, \quad (45)$$

missä  $\xi = \frac{t}{\tau}$  on suhteellinen aika raskauden alusta. Yhtälö on johdettu tähän muotoon AFRC:n nettoproteiinin tarpeen yhtälöistä [17].

- **Kasvu**

Kasvun nettoproteiinivirta  $\dot{m}_{Pr,g}$  (kg/ pv) lasketaan yhtälöstä

$$\dot{m}_{Pr,g} = c_{Pr,g}(t) \dot{m}_g(t), \text{ missä} \quad (46)$$

$$c_{Pr,g}(t) = 10^{-3} (168.07 - 0.16869m(t) + 0.0001633m(t)^2) (1.12 - 0.1223\dot{m}_g(t)) \quad (47)$$

on kasvun proteiinipitoisuus (kg/kg),  $\dot{m}_g(t)$  on kasvun massavirta yhtälöstä (22) ja  $m(t)$  eläimen paino yhtälöstä (20).

- **Painon vaihtelu**

Painon vaihtelun nettoproteiinivirta  $\dot{m}_{Pr,L}$  (kg/ pv) lasketaan yhtälöstä

$$\dot{m}_{Pr,L} = c_{Pr,L} \dot{m}_L(t), \text{ missä} \quad (48)$$

$$c_{Pr,L} = 0.138 \text{kg/kg ja } \dot{m}_L(t) \text{ on painon vaihtelun massavirta yhtälöstä (29).}$$

- **Maidon muodostuminen**

Maidon muodostumisen nettoproteiinivirta  $\dot{m}_{Pr,milk}$  (kg/ pv) lasketaan yhtälöstä

$$\dot{m}_{Pr,milk} = c_{Pr,milk}(t) \dot{m}_{milk}(t), \quad (49)$$

missä  $\dot{m}_{milk}(t)$  on raakamaidon muodostumisen massavirta ja  $c_{Pr,milk}(t)$  proteiinipitoisuus. Proteiinipitoisuus perustuu eläinkohtaisiin seurantamittauksiin.

- **Ylläpito**

Ylläpidon nettotyypivirta  $\dot{m}_{N,mt}$  (kg/ pv) lasketaan yhtälöstä [17]

$$\dot{m}_{N,mt} = \dot{m}_{N,be} + \dot{m}_{N,dl}, \quad (50)$$

missä  $\dot{m}_{N,be}$  on elintoimintojen tarvitsema typpi (Basal endogenous nitrogen (BEN), kg/ pv) ja  $\dot{m}_{N,dl}$  hilseilyn ja karvan lähdön typpihävikki (Dermal losses, kg/ pv). Nämä, sinänsä hyvin pienet virrat saadaan yhtälöistä

$$\dot{m}_{N,be} = 0.00035m(t)^{0.75} \quad (51)$$

ja

$$\dot{m}_{N,dl} = 0.000018m(t)^{0.75}, \quad (52)$$

missä  $m(t)$  eläimen paino yhtälöstä (20). Elintoimintojen ylläpitoon kulutettu typpi poistuu virtsassa.

## **Fosforin käyttö**

Malli laskee fosforin nettotarpeen sekä ylijäämän. Muita аспектеja, kuten imeytyvän fosforin riittävyys, ei huomioida. Seuraavassa kuvataan perustehtävien nettofosforivirtojen,  $\dot{m}_{P,i}$  mallit.

- **Sikiön kehittyminen**

Sikiön kehittymisen nettofosforivirta  $\dot{m}_{P,f}$  (kg/ pv) lasketaan yhtälöstä

$$\dot{m}_{P,f} = \left[ a e^{(b - c')t'} - a e^{(b - c(t'-1))(t'-1)} \right] m_C, \quad (53)$$

missä vakio  $a = 6.8575 \times 10^{-7} \text{ pv}^{-1}$ ,  $b = 0.05527$  ja  $c = 0.000075$ , ja  $m_C$  on vasikan syntymäpaino. Muuttuja  $t' = 280\xi$ , missä  $\xi = \frac{t}{\tau}$  on suhteellinen aika raskauden alusta. Yhtälö perustuu NRC:n antamaan sikiön fosforin tarpeen yhtälöön [23].

- **Kasvu**

Kasvun nettofosforivirta  $\dot{m}_{P,g}$  (kg/ pv) lasketaan yhtälöstä [23]

$$\dot{m}_{P,g} = c_{P,g}(t) \dot{m}_g(t), \text{ missä} \quad (54)$$

$$c_{P,g}(t) = 10^{-3} \times (1.2 + 4.635 \left( \frac{m_{mat}}{m(t)} \right)^{0.22}) \quad (55)$$

on kasvun fosforipitoisuus (kg/kg),  $\dot{m}_g(t)$  on kasvun massavirta yhtälöstä (22),  $m_{mat}$  eläimen paino täysikasvuisena ja  $m(t)$  eläimen paino tarkasteluhetkellä  $t$  yhtälöstä (20).

- **Painon vaihtelu**

Painon vaihtelun nettofosforivirta  $\dot{m}_{P,L}$  (kg/ pv) lasketaan yhtälöstä

$$\dot{m}_{P,L} = r_{P,Pr} \dot{m}_{Pr,L}(t), \text{ missä} \quad (56)$$

$r_{P,Pr} = 0.007$  on fosforin ja proteiinin massasuhte pehmytkudoksissa (kg P/kg Pr) [24] ja  $\dot{m}_{Pr,L}(t)$  on painon vaihtelun proteiinivirta yhtälöstä (48).

- **Maidon muodostuminen**

Maidon muodostumisen nettofosforivirta  $\dot{m}_{P,milk}$  (kg/ pv) lasketaan yhtälöstä

$$\dot{m}_{P,milk} = c_{P,milk} \dot{m}_{milk}(t), \quad (57)$$

missä  $\dot{m}_{milk}(t)$  on raakamaidon muodostumisen massavirta. Maidon fosforipitoisuus lasketaan yhtälöstä [25]

$$c_{P,milk} = 0.0146 c_{Pr,milk}(t) + 0.000487, \quad (58)$$

missä  $c_{Pr,milk}(t)$  seurantamittauksiin perustuva maidon proteiinipitoisuus.

- **Ylläpito**

Ylläpidon nettofosforivirta  $\dot{m}_{P,mnt}$  (kg/ pv) lasketaan yhtälöstä

$$\dot{m}_{P,mnt} = \dot{m}_{P,fe} + \dot{m}_{P,u}, \quad (59)$$

missä  $\dot{m}_{P,fe}$  on imeytyneen fosforin hävikki sonnassa (Fecal loss, kg/pv) ja  $\dot{m}_{P,u}$  vastaava hävikki virtsassa (Urinary loss, kg/pv). Nämä virrat lasketaan yhtälöistä [23]

$$\dot{m}_{P,fe} = a \dot{m}_{ka,Intake}(t) \quad (60)$$

ja

$$\dot{m}_{P,u} = b m(t), \quad (61)$$

missä  $\dot{m}_{ka,Intake}(t)$  on kuiva-aineen sisäänoton massavirta ja  $m(t)$  eläimen paino yhtälöstä (20). Vakio  $a = 0.001$  lypsäville eläimille. Muille eläimille  $a = 0.0008$ . Vakio  $b = 0.000002 \text{ pv}^{-1}$ . Yhtälöä (60) ei kuitenkaan käytetä mallissa, vaan absorboituneen fosforin virta lannassa lasketaan vähentäen imeytyneestä fosforivirrasta käyttöön (pois lukien ylläpito) ja virtsaan yhteensä siirtynyt fosforivirta. Virtsan fosfori lasketaan yhtälöstä (61).

### **4.3.3. Energian ja ravinteiden hankinta**

Mallissa oletetaan, että eläin syö vain ja ainoastaan energiantarpeensa tyydyttämiseksi. Lisäksi oletetaan, että sillä on aina saatavilla riittävästi sellaisia rehuja, joilla se pystyy energian tarpeensa täysin tyydyttämään.

- **Entalpiatase**

Näistä oletuksista lähtien muodostetaan entalpiatase, joka muodostaa kaikkien ainevirtojen taseiden perustan. Se on yksinkertaisesti seuraava: Ajanhetkellä  $t$  perustoimintojen käyttöön tarvittava bruttoentalpiavirta on yhtä suuri kuin ruoan sulatuksesta imeytyvä entalpiavirta, yhtälönä

$$\sum_j \dot{H}_{me,j} = \dot{H}_{me} = \sum_i \frac{\dot{H}_{net,i}}{\eta_i} \quad (62)$$

Tässä yhtälön oikea puoli on yhtälöstä (14).  $\dot{H}_{me,j}$  on rehusta  $j$  syntyvän metabolisoituvan entalpian virta solumetaboliaan. Se määräytyy rehun kuiva-ainevirrasta ja sille määritetyn metabolisoituvan entalpian ominaisarvosta yhtälön

$$\dot{H}_{me,j} = \dot{m}_{j,ka} h_{me,j} = \dot{m}_{ka} \varphi_j h_{me,j}, \quad (63)$$

mukaan. Tässä  $\varphi_j$  on rehun  $j$  osuus eläimen kaikkiaan syömän rehun kuiva-aineesta. Keskimääräinen metabolisoituva entalpia ja vastaava palamisentalpia ovat

$$h_{me}(\varphi) = \sum_j \varphi_j h_{me,j}, \quad (64)$$

$$h_0(\varphi) = \sum_j \varphi_j h_{0,j}. \quad (65)$$

Entalpian käytön hyötysuhteeseen vaikuttava konversiosuhteen,  $q$  arvo riippuu siis myös kuiva-aineprofiilista, mikä vuorostaan merkitsee sitä, että metabolisoituvan entalpian kysyntä riippuu tarjonnasta. Taseyhtälön yleinen ratkaisu on näin ollen iteratiivinen:

$$\dot{H}_{me_{n+1}} = \sum_i \frac{\dot{H}_{net,i}}{\eta_i(q(\varphi_n))} \text{ ja } \varphi_{n+1} = \varphi(\dot{H}_{me_{n+1}}), n = 0, 1, 2, \dots \quad (66)$$

$$\text{kunnes } |\dot{H}_{me_{n+1}} - \dot{H}_{me_n}| / \dot{H}_{me_{n+1}} \leq \varepsilon$$

Seosruokinnassa kuiva-aineprofiili ei muutu, joten sen mallinnuksessa iterointi päättyy heti ensimmäiseen aloitusarvon jälkeen laskettuun arvoon, jos  $q$ :n alkuarvona käytetään seokselle laskettua arvoa. Tasaväkirehuruokinnassa taas kuiva-aineprofiili muuttuu, ja tarvitaan useampia iterointikierroksia. Iteroinnin tarkkuus on  $\varepsilon = 0.01$ . Mallissa on mukana kummatkin ruokintastrategiat.

- **Kuiva-ainevirta sisään**

Kuiva-ainevirran,  $\dot{m}_{ka,me,Intake}$  ja palamisentalpiavirran  $\dot{H}_{0,me,Intake}$  ratkaisut yhtälön (66) antamasta metabolisoituvan entalpian virrasta ovat

$$\dot{m}_{ka,me,Intake} = \dot{H}_{me} / h_{me} \text{ ja} \quad (67)$$

$$\dot{H}_{0,me,Intake} = \dot{m}_{ka,me} h_0. \quad (68)$$

Nämä kuvaavat metabolisoituvan entalpian muodostuksessa osallisina olevia, muuntuvia virtoja. Pötsin läpivirtauksen kasvusta ja siitä seuraavasta viipymääjän lyhentymisestä aiheutuvan sulavuuden



pienentymisestä johtuen kokonaisvirtaukset sisään eläimeen ovat näitä suurempia. Tämä otetaan huomioon ruokintatasosta ( $\lambda$ ) riippuvalla kertoimella [17]

$$\mu(\lambda) = 1 + 0.018 * (\lambda - 1), \quad (69)$$

Kuiva-aineen sisäänoton kokonaismassavirran yhtälö on siis

$$\dot{m}_{ka,Intake} = \mu \dot{m}_{ka,me,Intake} = \mu \dot{H}_{me} / h_{me} \quad (70)$$

Muuntumattoman ohivirtauksen yhtälö on vastaavasti

$$\dot{m}_{ka,pass} = (1 - 1/\mu) \dot{m}_{ka} \quad (71)$$

- **CH<sub>4</sub> -päästöt ilmaan**

Pötsin mikrobitoiminnasta syntyy metaanikaasua (CH<sub>4</sub>), joka poistuu eläimestä ympäristöön. CH<sub>4</sub> – päästöt lasketaan kansallisessa kasvihuonekaasuinventaariossa käytetyllä [9] tavalla metabolisoituvan entalpian muodostuksessa osallisena olevasta palamisentalpiasta yhtälöstä,

$$\dot{m}_{CH_4} = c_{CH_4}(t) \frac{\dot{H}_{0,me,Intake}}{h_{CH_4}}, \text{ missä} \quad (72)$$

$$c_{CH_4}(t) = \frac{kt}{0.065}, \quad t \leq 63 \text{ pv}, \quad k = (0.065/63) \text{ pv}^{-1} \text{ ja} \quad (73)$$

$$\text{metaanin palamisentalpia } h_{CH_4} = 55.52 \text{ MJ/kg} \quad [26] \quad (74)$$

- **Typpitase**

Typpitaseen erät ja ne määrittelevät yhtälöt sekä erien kohteet on esitetty taulukossa 13. Taulukon yhtälöissä esiintyvät parametrit  $c_{rv}$  ja  $\delta_{rv}$  ovat rehuseoksen raakavalkuaispitoisuus (kg/kg) ja raakavalkuaisen sulavuus (kg/kg), jotka saadaan yhtälöistä

$$c_{rv} = \sum_i \varphi_i c_{rv,i} \text{ ja} \quad (75)$$

$$\delta_{rv} = \sum_i \vartheta_i \delta_i, \text{ missä} \quad (76)$$

$c_{rv,i}$  on rehun  $i$  raakavalkuaispitoisuus (kg/kg),  $\varphi_i$  osuus seoksen kuiva-aineesta,  $\delta_i$  raaka-valkuaisen sulavuus ja  $\vartheta_i$  osuus seoksen raakavalkuaisesta (kg/kg),

$$\vartheta_i = \varphi_i \frac{c_{rv,i}}{c_{rv}} \quad (77)$$

**Taulukko 13.** Tyypitaseen erät, määrittely-yhtälöt ja kohteet.

Tyypitaseen erä	Yhtälö	Kohde
Typen sisäänoton massavirta eläimeen	$\dot{m}_{N,Intake} = \dot{m}_{ka,Intake}c_{rv}/6.25$	(78) Eläin
Sulatuksen ohittavan typen massavirta	$\dot{m}_{N,Pass} = \dot{m}_{ka,pass}c_{rv}/6.25$	(79) Sonta
Sulatukseen osallistuvan typen massavirta	$\dot{m}_{N,me,Intake} = \dot{m}_{ka,me,Intake}c_{rv}/6.25$	(80) Sulatus
Sulatuksessa sulamatta jääneen typen massavirta	$\dot{m}_{N,me,pass} = \dot{m}_{ka,me,Intake}c_{rv}(1 - \delta_{rv})/6.25$	(81) Sonta
Metabolisoituvan typen massavirta	$\dot{m}_{N,me} = \dot{m}_{ka,me,Intake}c_{rv}\delta_{rv}/6.25$	(82) Solumetabolia
Sikiön kasvu	$\dot{m}_{N,f}$	Käyttö, ks. yhtälö 44
Kasvu	$\dot{m}_{N,g}$	Käyttö, ks. yhtälö 46
Painon vaihtelu	$\dot{m}_{N,L}$	Käyttö, ks. yhtälö 48
Maidon muodostuminen	$\dot{m}_{N,milk}$	Käyttö, ks. yhtälö 49
Ylläpito	$\dot{m}_{N,mt}$	Käyttö, valtaosa poistuu virtsaan, hyvin pieni määrä muuta kautta
Ylijäämä	$\dot{m}_{N,u} = \dot{m}_{N,me} - \dot{m}_{N,f} - \dot{m}_{N,g} - \dot{m}_{N,L} - \dot{m}_{N,milk}$	(83) Virtsa

### • Fosforitase

Fosforitaseen erät ja ne määrittelevät yhtälöt sekä erien kohteet on esitetty taulukossa 14. Taulukon yhtälöissä esiintyvät parametrit  $c_P$  ja  $\alpha_P$  ovat rehuseoksen fosforipitoisuus (kg/kg) ja fosforin imeytyminen (imeytyvän fosforin absoluuttinen osuus, kg/kg), jotka saadaan yhtälöistä

$$c_P = \sum_i \varphi_i c_{P,i} \text{ ja} \quad (84)$$

$$\alpha_P = \sum_i \pi_i \alpha_i . \quad (85)$$

Yhtälöissä  $c_{P,i}$  on rehun  $i$  fosforipitoisuus (kg/kg),  $\varphi_i$  osuus seoksen kuiva-aineesta,  $\alpha_i$  fosforin imeytyminen (kg/kg) ja  $\pi_i$  osuus seoksen fosforista (kg/kg),

$$\pi_i = \varphi_i \frac{c_{P,i}}{c_P} . \quad (86)$$

**Taulukko 14.** Fosforitaseen erät, määrittely-yhtälöt ja kohteet.

Fosforitaseen erä	Yhtälö	Kohde
Fosforin sisäänoton massavirta eläimeen	$\dot{m}_{P,Intake} = \dot{m}_{ka,Intake}C_P$	(87) Eläin
Sulatuksen ohittavan fosforin massavirta,	$\dot{m}_{P,Pass} = \dot{m}_{ka,pass}C_P$	(88) Sonta
Sulatukseen osallistuvan fosforin massavirta,	$\dot{m}_{P,me,Intake} = \dot{m}_{ka,me,Intake}C_P$	(89) Sulatus
Sulatuksessa imeytymättä jääneen fosforin massavirta,	$\dot{m}_{P,me,pass} = \dot{m}_{ka,me,Intake}C_P(1 - \alpha_P)$	(90) Sonta
Metabolisoituvan fosforin massavirta	$\dot{m}_{P,me} = \dot{m}_{ka,me,Intake}C_{rv}\alpha_P$	(91) Solumetabolia
Sikiön kasvu	$\dot{m}_{P,f}$	Käyttö, ks. yhtälö 53
Kasvu	$\dot{m}_{P,g}$	Käyttö, ks. yhtälö 54
Painon vaihtelu	$\dot{m}_{P,L}$	Käyttö, ks. yhtälö 56
Maidon muodostuminen	$\dot{m}_{P,milk}$	Käyttö, ks. yhtälö 57
Ylläpito	$\dot{m}_{P,mnt}$	Käyttö, poistuu virtsaan ja sontaan, ks. yhtälö 59
Ylijäämä	$\dot{m}_{P,fe} = \dot{m}_{P,Intake} - \dot{m}_{P,f} - \dot{m}_{P,g} - \dot{m}_{P,L} - \dot{m}_{P,milk} - \dot{m}_{P,u}$	(92) Sonta

## • Vesitase

Juomaveden tarve (kg/pv) lasketaan yhtälöstä

$$\dot{m}_{H_2O,Intake,free} = \dot{m}_{H_2O,Intake} - \dot{m}_{H_2O,feed} \text{ , missä} \quad (93)$$

$\dot{m}_{H_2O,Intake}$  on kokonaisvesivirta sisään ja  $\dot{m}_{H_2O,feed}$  rehun vesivirta.

Kokonaisvesivirta sisään (kg/pv) lasketaan yhtälöstä [27]

$$\dot{m}_{H_2O,Intake} = 3.89\dot{m}_{ka,Intake} + 0.81\dot{m}_{milk} + 9.4 \times 10^{-4} c_{Pf}^2 - 0.08c_{Pc} - 0.94 \quad (94)$$

missä  $\dot{m}_{ka,Intake}$  on kuiva-aineen sisään otto,  $\dot{m}_{milk}$  maidon muodostuminen,  $c_{Pf}$  karkearehun raakavalkuaispitoisuus kuiva-aineessa (g/kg ka) ja  $c_{Pc}$  väkirehun raakavalkuaispitoisuus kuiva-aineessa (g/kg ka). Rehun vesivirran yhtälö on

$$\dot{m}_{H_2O,feed} = \dot{m}_{ka,Intake} \sum_i \varphi_i \frac{1 - x_{ka,i}}{x_{ka,i}}. \text{ missä} \quad (95)$$

$x_{ka,i}$  on rehun  $i$  kuiva-ainepitoisuus ja  $\varphi_i$  osuus seoksen kuiva-aineesta.

Sonnassa poistuva vesivirta (kg/pv) lasketaan yhtälöstä

$$\frac{1 - x_{ka,fe}}{x_{ka,fe}} \dot{m}_{ka,fe}, \text{ missä} \quad (96)$$

$$x_{ka,fe} = 0.041c_{vr} - 0.031\dot{m}_{milk} - 0.14\dot{m}_{ka,Intake} - 4.5 \times 10^{-5} c_{pf}^2 + 16.28 \quad (97)$$

on sonnan kuiva-ainepitoisuus (kg/kg) [27] ja

$$\dot{m}_{ka,fe} = \dot{m}_{ka,Intake} - \dot{m}_{ka,me} \text{ on sonnan kuiva-ainevirta.} \quad (98)$$

Kuiva-ainepitoisuuden yhtälössä  $c_{vr}$  on väkirehun osuus rehuseoksen tuoreaineesta (g/100g eli %), muut parametrit ja muuttujat kuten yhtälössä (94). Kuiva-ainevirran yhtälössä tarvittava metabolisoituva kuiva-ainevirta,  $\dot{m}_{ka,me}$  lasketaan yhtälöllä

$$\dot{m}_{ka,me} = \dot{m}_{oa,me,Intake} \delta_{oa}, \quad (99)$$

Missä  $\dot{m}_{oa,me,Intake}$  on sulatukseen osallistuvan orgaanisen aineen virta ja  $\delta_{oa}$  orgaanisen aineen sulavuus.

Virtsassa poistuva vesivirta (kg/pv) lasketaan yhtälöstä [27]

$$\dot{m}_{H_2O,u} = 0.88\dot{m}_{ka,Intake} + 9.3 \times 10^{-4} c_{pc}^2 + 0.263c_{pf} - 2.2 \times 10^{-4} c_{pf}^2 - 19.8, \quad (100)$$

missä kaikki parametrit ja muuttujat ovat kuten yhtälössä (94).

Maidossa poistuva vesivirta (kg/pv) lasketaan yhtälöstä

$$\dot{m}_{H_2O,milk} = 0.873\dot{m}_{milk}, \quad (101)$$

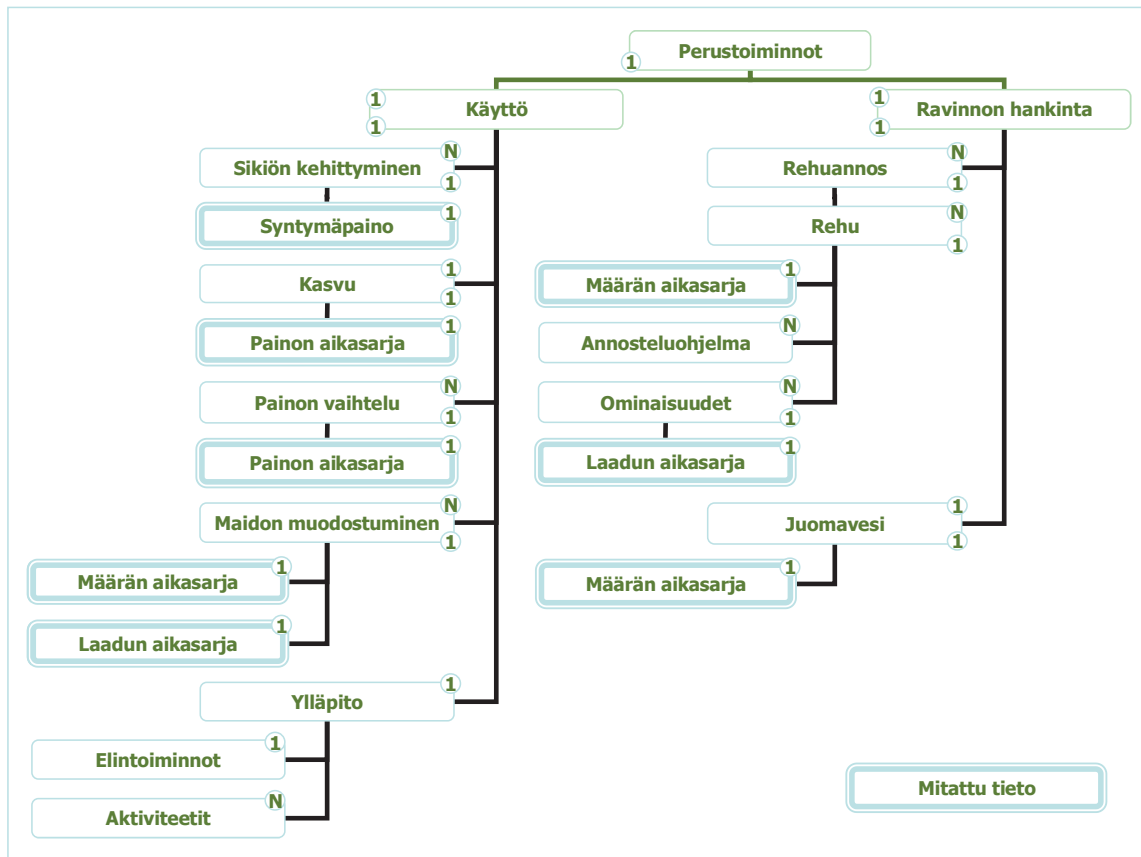
missä 0.873 maidon vesipitoisuus (kg/kg).

Muita vesitaseen eriä mallissa ei tässä vaiheessa tarkastella.

#### **4.3.4. Eläimen elinkaarimalli**

##### ***Elinkaaren relaatiomalli***

Eläimen elinkaaren relaatiomalli, joka kuvaa elinkaaren perustoimintojen instansseita muodostuvana kokonaisuutena, ilmenee kuvasta 13.



**Kuva 13.** Eläimen elinkaaren relaatiomalli perustoimintojen avulla kuvattuna. Relaatiotyypit on merkitty muuttujia kuvaavien laatikoiden vastakkain oleviin kulmiin. Esimerkiksi 'Käyttö-Maidon muodostuminen' on 1-N eli yksi moneen relaatio eli jokainen laktatiokausi on oma maidon muodostumisen instanssi. 'Maidon muodostuminen – Määrän aikasarja' – relaatio on yksi yhteen eli jokaisella laktatiokaudella on yksi määrän aikasarja ja päinvastoin.

Malli liittää yhteen eläimen perustoiminnot ja eläimen sisään ottamien ravintoaineiden virrat sekä niiden käytöstä syntyvät jätevirrat ja päästöt. Liitoksen tuloksena syntyy eläimen ainetaseen kulun eläimen elinkaareissa kuvaava malli. Mallin pääosat ovat käyttö ja hankinta. Käyttö käsittää entalpia- ja ainevirtoja käyttävät perustoiminnot ja hankinta ravinnon ja veden sisäänottoa käyttöä varten.

Käytön ja hankinnan toiminnot muodostavat instansseja, jotka ovat määrättyyn ajanjaksoon eläimen elinkaareissa kiinnittyviä aikasarjoja. Instanssit mallinnetaan nojautuen ensisijaisesti niistä kerättyihin mittaustietoihin. Sikiön kehittymisen mallissa syntymäpaino päivitetään vasikan syntymän jälkeen mitattuun, todelliseen syntymäpainoon. Kasvun ennustemallin parametrejä päivitetään painon mittauksista kertyviä aikasarjatietoja hyväksi käyttäen. Painon vaihtelun maksimi-arvo päivitetään mallissa painon mittauksista saatavia tietoja hyväksi käyttäen. Maidon muodostumisen massavirran malli täsmätään mitattuihin tuotantomääriin ja maidon laatu mitattuihin laatu-tietoihin. Ravinnon hankinnan mallissa rehuannokset mallitetaan ensisijaisesti mitattujen annosmäärien ja laatu-tietojen sekä ruokintaohjelmien perusteella.

Mallilla kuvataan tapahtumat eläimen syntymästä eteenpäin. Malli soveltuu kuitenkin myös eläimen oman sikiökehitysvaiheen mallintamiseen. Seuraavassa tarkastellaan aluksi syntymän jälkeiseen aikaan sijoittuvaa elinkaarta ja sen jälkeen sikiövaiheen elinkaarta eläimen emän elinkaaresta käsin.

#### 4.3.5. Elinkaaren malli syntymästä eteenpäin

Eläimen elinkaareissa esiintyy sekä toistuvia että koko elinkaaren yli jatkuvia toimintoinstansseja. Käytön piirissä toistuvia instansseja ovat sikiön kehittyminen (raskausaika), painon vaihtelu (laktaatiokausi), ja maidon muodostuminen (laktaatiokausi). Jokainen raskaus on erilainen, jokainen synnytyksen jälkeinen painon vaihtelu on erilainen ja jokainen laktaatiokausi on erilainen. Kasvu ja ylläpito taas jatkuvat katkeamatta syntymästä elinkaaren loppuun, erityisesti ensin mainittu tosin loppua kohden hiipuen. Hankinnan puolella rehuannos vaihtuu uuteen laktaatiokauden vaiheeseen, eläimen iän ja ruokintakauden (sisäruokinta/laidun) muutoksia seuraten. Juomavesi taas pysyy käytännössä ominaisuuksiltaan samana ja sen hankinta jatkuvana koko elinkaaren ajan.

- **Perustoimintojen ainevirrat**

Perustoimintojen ainevirroilla tarkoitetaan mallissa rehuvirtoja ja niiden yhteensä sisältämää kuiva-ainetta ja vettä, eläimestä poistuvaa sonta- ja virtsavirtaa ja näiden mukana kulkevia typen, fosforin ja veden virtoja, sekä metaanipäästön virtaa ilmaan. Nämä virrat ovat suoraan verrannollisia bruttoentalpian käyttöön. Lisäksi ainevirtoihin kuuluu veden käyttö, joka riippuu bruttoentalpian käytöstä epäsuorasti.

Bruttoentalpian käyttöön suoraan verrannolliset kokonaisainevirrat  $\dot{\mathbf{m}}(t)$  jakautuvat perustoiminnoille näiden käyttämien bruttoentalpioiden suhteessa:

$$\dot{\mathbf{m}}_i(t) = \varphi_{me,i} \dot{\mathbf{m}}(t), \quad i \in \{f, g, L, milk, mnt\}, \quad (102)$$

$$\text{missä } \varphi_{me,i} = \frac{\dot{H}_{me,i}(t)}{\sum_i \dot{H}_{me,i}(t)} \quad (103)$$

on toiminnon  $i$  osuus bruttoentalpian kokonaiskäytöstä. Veden kokonaissisäänotto jaetaan perustoiminnoille samalla tavalla. Ennen jakoa veden käytöstä vähennetään kuitenkin maitoon siirtyvä vesi, joka kohdistetaan erikseen maidon muodostumiselle. Näin saadaan kunkin perustoiminnon kokonaissisäänoton kuvaava yhtälö

$$\dot{m}_{H_2O,Intake,i}(t) = \begin{cases} \varphi_{me,i} [\dot{m}_{H_2O,Intake}(t) - \dot{m}_{H_2O,milk}], & i \in \{f, g, L, mnt\} \\ \varphi_{me,i} [\dot{m}_{H_2O,Intake}(t) - \dot{m}_{H_2O,milk}] + \dot{m}_{H_2O,milk}, & i \in \{milk\} \end{cases} \quad (104)$$

Juomaveden tarve saadaan vähentämällä tästä rehun mukana sisään otettu vesi (vrt. yhtälö 93).

- **Ainevirtojen kertymät**

Ympäristötietojen tuottaminen käytännön tarpeisiin edellyttää, että perustoimintojen ainevirtojen aikasarjoja integroidaan tarkoitukseen sopivasti. Ainevirtojen kertymät ovat kuitenkin toimintoinstanssien eroista johtuen erilaiset eri aikoina. Tietyllä aikavälillä  $[t_1, t_2]$  kertyneet ainevirrat  $\Delta \mathbf{m}$  perustehtävään  $i$  ovat, perustoiminnon päätuotos mukaan luettuna, integraaleja tarkasteluaikavälin yli

$$\Delta \mathbf{m}_i = \int_{t_1}^{t_2} \dot{\mathbf{m}}_i(t) dt \quad (105)$$

Kertynyt päätuotos voi kuitenkin olla hyödynnettävissä joko instanssin kestäessä (maidon muodostuminen) tai vasta sen päättymisen jälkeen (sikiön kehittyminen ja eläimen oma kasvu). Tietyissä perustoiminnoissa ei synny hyödynnettävää tuotosta lainkaan (ylläpito ja painon vaihtelu). Tästä johtuen kertymistä voi muodostuakin panosten ja päätuotosten suhteista hyvin erilaisia kuvia riippuen siitä, miten tarkastelujakso valitaan. Jos jakso valitaan elinkaaren, alusta voidaan lypsylehmän maitotuotokseksi saada nolla, koska maidon muodostuminen alkaa vasta tarkastelujakson jälkeen, ensimmäisestä poikimisesta. Eläimen kasvu taas on tässä vaiheessa voimakasta ja kertymä voi tuottaa tarkastelujakson pituudesta riippuen hyvinkin suuren osan eläimen elopainosta. Ensimmäisen sikiön kehittyminen asettuu ehkä vain osittain tarkastelujaksolle, jolloin sen tuotoksesta muodostuva kuva jää vajaaksi. Pitkän elinkaaren loppupuolelta valitulla tarkastelujaksolla kasvu on hiipunut lähes olemattomaksi, mutta maidon muodostuminen voi jatkua suhteellisen normaalilla tasolla ja jälkeläisiäkkin vielä syntyä. Tästä tarkastelujaksosta muodostuva kuva perustoimintojen panos ja tuotosvirroista on aivan erilainen kuin se, mikä muodostuu elinkaaren alulta valitusta jaksosta.

Tarkastelujakson valinnasta johtuva kuvauksen epävarmuus voidaan välttää, jos niissä perustoiminnoissa (sikiön kehittyminen ja eläimen oma kasvu), joissa tuotos tulee ulkoisesti hyödynnettäväksi vasta instanssin päätyttyä, määritellään päätuotos, kaikki panokset, päästöt ja sivuvirrat kertymiksi instanssin alusta lähtien. Ne muodostavat ikään kuin sisällön selkäreppuun, joka täyttyy määrättyllä nopeudella instanssin kestäessä, ja jonka päätuotos saa mukaansa hyödyntämiseen siirtyessään. Siihen saakka selkäreppu on tilan varastossa. Tätä käsittelytapaa sovelletaan tässä mallissa sikiön kehittymiseen ja eläimen omaan kasvuun sekä yhtenäisyyden vuoksi myös maidon muodostumiseen. Panos- ja tuotosvirtojen syntymän jälkeiset kertymät  $\mathbf{m}_i(t)$  perustehtävän  $i$  instanssin elinkaaren ajanhetkellä  $t$  lasketaan yhtälöistä

$$\mathbf{m}_i(t) = \int_0^t \dot{\mathbf{m}}_i(t') dt', \quad i \in \{f, g, L, milk, mnt\} \quad (106)$$

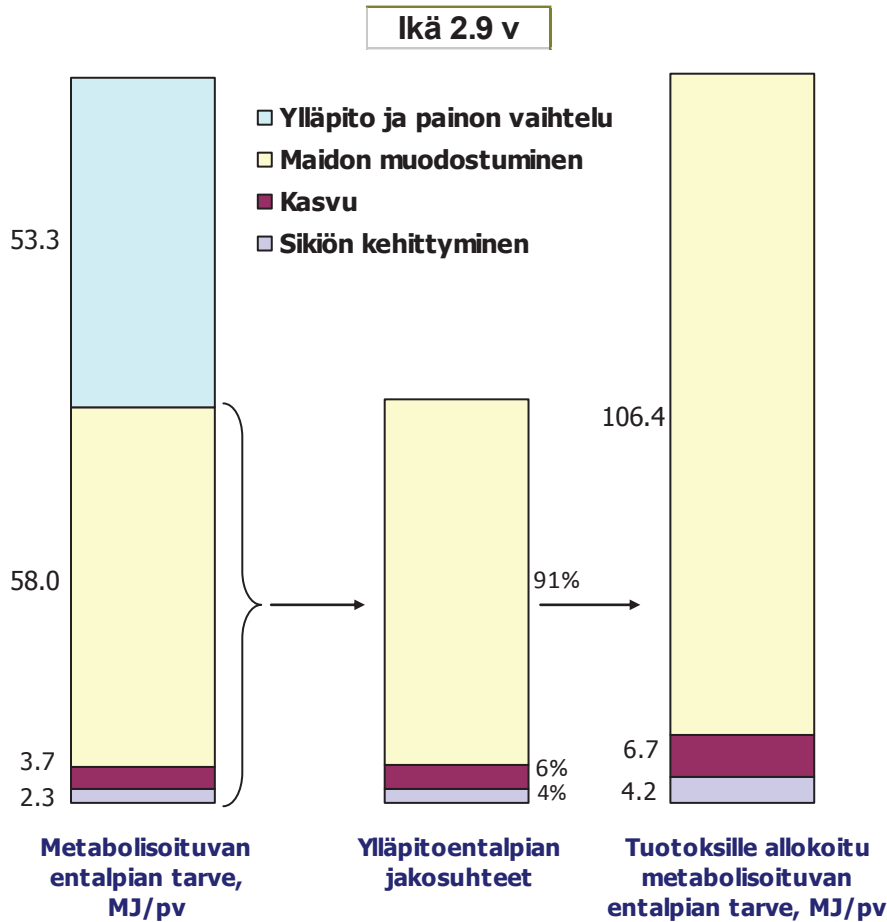
Kertymät siirtyvät tilan varastoon siksi aikaa, kunnes instanssin päätuotos (maito, elän) siirtyy instanssin lopussa hyödynnettäväksi. Tällöin kertyneet panokset ja tuotokset poistetaan tilan varastosta ja siirretään eläimen mukana hyödyntäjälle. Jos instanssin päätuotetta ei voida toimittaa hyödyntämiseen, sen selkäreppu jää tilan varastoon, kunnes se poistetaan siirtämällä sinne kertyneet panokset ja tuotokset hyödynnykseen meneviin selkäreppuihin. Tällaiset tilanteet ovat harvinaisia. Maidon tapauksessa jokin infekcio esimerkiksi voi aiheuttaa sen, että maitoa ei voida tiettyinä ajanjaksona hyödyntää. Joskus voi eläimen kuoleman tai poiston aiheuttanut tauti tai muu syy aiheuttaa sen, että eläintä ei voida hyödyntää. Hyödyntämättömistä päätuotteista varastoon jääneiden panosten ja tuotosten poistot tehdään karjamallin tasolla.

- **Päätuotteiden ympäristötietojen tuottaminen**

Päätuotteiden ympäristötietojen tuottaminen edellyttää aikasarjojen integrointien lisäksi, että hyödynnettäviä tuotoksia tuottamattomien perustoimintojen (ylläpito, painon vaihtelu) instanssien panokset ja tuotokset jaetaan päätuotteita tuottavien (maito, eläin) kesken. Elinkaariarvioinneissa on käytetty monia menetelmiä tämän jaon suorittamiseksi. Varsin suosittu menetelmä on ollut sellainen, jossa jakosuhteet määrätään maidosta ja eläimestä (hyödynnettynä = liha) saatujen taloudellisten tuotosten perusteella. Tuotosten laskentaperuste on tällöin yleensä yhden vuoden mittainen tuotantokausi perushinnoin. Yksikköperushintojen suhde kuitenkin vaihtelee vuosittain, mikä tekee tätä menetelmää käyttäen eri aikoina tehdyt elinkaariarvioinnit vaikeasti vertailtaviksi, usein käytännössä vertailukelvottomiksi. Tämä on kestävyyyden hallinnan ja kehittämisen kannalta epäkohta.



Tässä mallissa jakomenetelmäksi ehdotetaan, ja pilotointiversiossa myös käytettiin, perustoimintojen bruttoentalpian käyttöön perustuvaa menetelmää. Menetelmällä saavutetaan se etu, että sen perusteet eivät ole alttiita suhdannemuutoksille, ja siksi tätä menetelmää käyttäen eri aikoina tehdyt elinkaariarvioinnit ovat vertailukelpoisia.



**Kuva 14.** Ylläpidon ainevirtojen jakamisessa käytetyn menetelmän toimintaperiaate. Esimerkijäettavana ylläpidon ja painon vaihtelun metabolisoituva entalpia. Ainevirrat jaetaan samassa suhteessa.

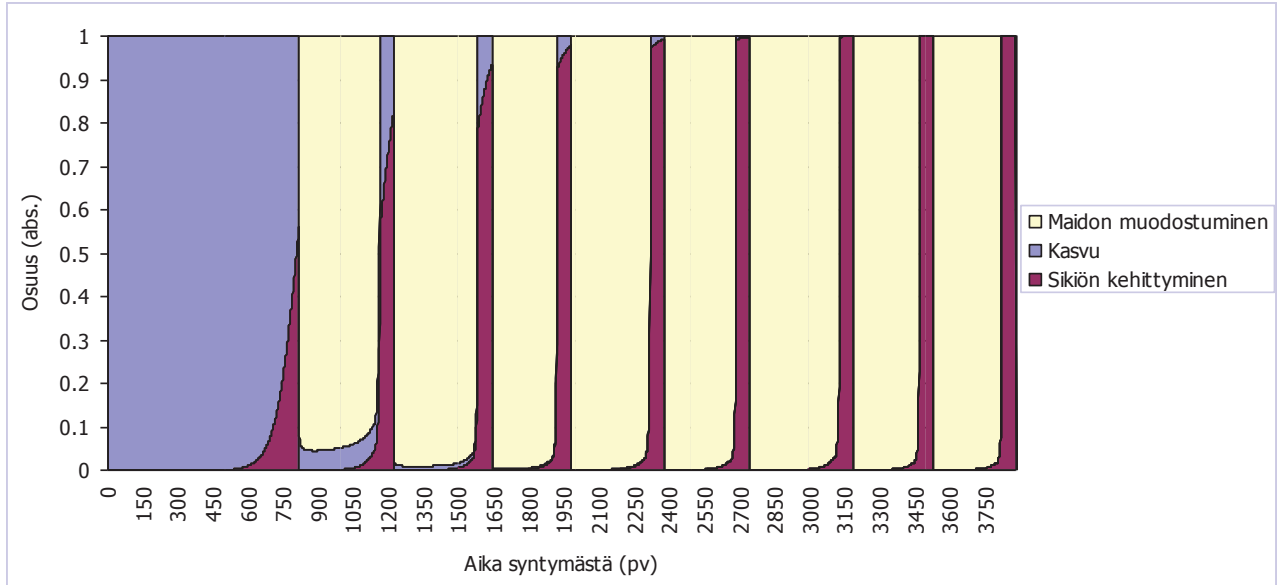
Menetelmässä jaetaan hyödynnettäviä tuotteita tuottamattomien toimintojen ainevirrat hyödynnettäviä tuotteita tuottavien toimintojen kesken. Jaettavana ovat käytännössä ylläpidon ainevirrat, sillä painon vaihtelusta, joka on oletettu joka instanssissa täysin palautuvaksi prosessiksi, ei kerry jaettavaa. Painon vaihtelun bruttoentalpiavirta on lisäksi varsin pieni ylläpidon vastaavaan entalpiavirtaan verrattuna. Täydellisyyden vuoksi se on kuitenkin otettu huomioon seuraavassa allokoinnin kuvaavassa yhtälössä.

Kuva 14 havainnollistaa jakomenetelmän periaatetta. Jako suoritetaan sikiön muodostumisen, eläimen oman kasvun ja maidon muodostumisen kesken. Kullekin näistä toiminnoista siirretään ylläpidon ja painon vaihtelun ainevirroista ajanhetkellä  $t$  suhteellisesti samansuuruinen erä, kuin mikä on tämän toiminnon osuus siirron kaikkiaan vastaanottavien toimintojen yhteenlasketusta bruttoentalpiasta, yhtälönä

$$\dot{\mathbf{m}}'_i(t) = \dot{\mathbf{m}}_i(t) + \alpha_{me,i}(\dot{\mathbf{m}}_{mnt}(t) + \dot{\mathbf{m}}_L(t)), \quad i \in \{f, g, milk\} \quad (107)$$

$$\text{missä } \alpha_{me,i} = \frac{\dot{H}_{me,i}(t)}{\sum_i \dot{H}_{me,i}(t)}, \quad i \in \{f, g, milk\} \quad (108)$$

Toimintojen päätuotosten eli sikiön kasvun, eläimen oman kasvun ja maidon muodostumisen massavirrat säilyvät jaossa muuttumattomina. Siirron tuloksena muodostuneiden, allokoitujen ainevirtojen kertymät lasketaan yhtälöstä (106) sijoittaen massavirran paikalle allokoitu massavirta yhtälöstä (107). Kuvassa 15 on esimerkki menetelmän toiminnasta eläimen elinkaaressa.



**Kuva 15.** Esimerkki ylläpidon ainevirtojen jakautumisesta eläimen elinkaaressa bruttoentalpian käyttöön perustuvalla menetelmällä.

#### 4.3.6. Sikiövaiheen malli

Sikiövaiheen mallia käytetään emältä raskauajalta jälkeläiselle periytyvien ainevirtojen laskemiseen. Näitä tietoja käytetään eläimen kokonaisainevirtakertymien määrittämiseen, joita tarvitaan sekä päätuotteiden ympäristötietojen tuottamisessa tilalla että tilan ulkopuolella, eläimen siirtyessä jatkokasvatukseen.

Malli toimii käänteisesti edellä esitetyn elinkaarimallin 'Käyttö-Sikiön kehittyminen' relaatioon (kuva 13) nähden. Sen relaatio on 'Sikiön kehittyminen-Emän käyttö', joka kiinnittyy kerrallaan yhden sikiön kehittymiseen (eli relaation tyyppi on yksi yhteen).

Malli siirtää sikiön kehittymisen ainevirrat emältä  $D$  tulevan jälkeläisen  $C$  kasvulle. Siirron jälkeen emän ja jälkeläisen virrat ovat emän elinkaaren kohdassa  $t$

$$\dot{m}_{D,f}''(t) = 0 \quad (109)$$

$$\dot{m}_{C,g}''(t - t_0) = \dot{m}_{D,f}'(t) \quad (110)$$

$$\dot{m}_{D,i}''(t) = \dot{m}_{D,i}'(t), \quad i \in \{g, milk\} \quad (111)$$

Tässä  $t_0$  on jälkeläisen syntymäaika emän elinkaareissa. Siirtoa edeltävät virrat on merkitty yksinkertaisella ja siirron jälkeiset kaksinkertaisella yläpilkulla. Emän muiden toimintojen (oma kasvu ja maidon muodostuminen) ainevirrat pysyvät siirrossa ennallaan. Jälkeläisen elinkaaren aikajanalla sikiön kehittyminen asettuu välille  $(-\tau, 0)$ , missä  $\tau$  on raskausajan pituus.

#### 4.3.7. Koko elinkaaren malli

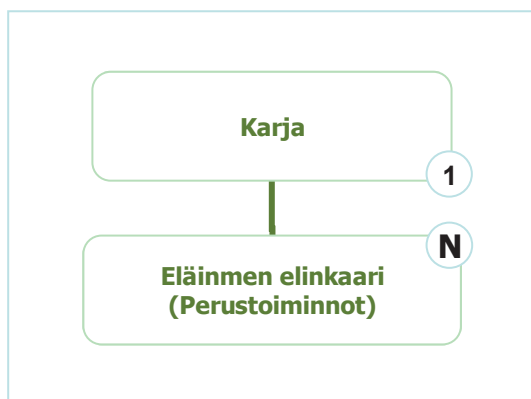
Eläimen elinkaari muodostuu sikiövaiheen ja syntymän yhteenliittymänä. Elinkaaren alkupiste on munasolun hedelmöitymisessä ja loppupiste syntymän jälkeisen elinkaaren päätepisteessä. Ainevirtojen kertymät lasketaan ottaen huomioon ylläpidon (ja painon vaihtelun) ainevirtojen allokoinnit sekä emän ja sikiön väliset siirtymät yhtälöstä:

$$\mathbf{m}_i(t) = \int_{-\tau}^t \dot{\mathbf{m}}_i''(t') dt', \quad i \in \{g, milk\} \quad (112)$$

Tässä vaiheessa ovat mukana siis vain päätuotteita tuottavat perustoiminnot. Muiden toimintojen ainevirrat on jaettu näille kuvatuilla menetelmillä.

#### 4.3.8. Karjan elinkaarimalli

Karjan elinkaarimalli, lyhemmin karjamalli, on yksittäisten eläinten elinkaarimalleista muodostuva dynaaminen yhdistelmäelinkaarimalli, karjainstanssi, jonka relaatiokuvaus on kuvassa 16. Karjamallin systeemiraja seuraa eläinten ulkopintaa, toisin sanoen malli ei sisällä karjasuojia, ruokinta- tai lypsyjärjestelmiä, ym. fasilitetteja, joita eläinten hoidossa tarvitaan. Nämä liittyvät mukaan seuraavalla eli tuotteen elinkaaren tasolla, jota tässä yhteydessä ei tarkastella. Karjamalliin liittyy uusia eläimiä, jotka syntyvät tilalla tai hankintaan toisilta tiloilta. Siitä eroaa eläimiä eri syistä tapahtuvien poistojen kautta. Karjamallin eläinmäärä kasvaa tai vähenee liittyvän ja eroavan eläinvirran erotuksen määräämällä vauhdilla.



Kuva 16. Karjan relaatiomalli..

#### Eläinten elinkaarista periytyvät ainevirrat

Karjamalli perii elinkaari-instanssien ainevirrat. Perimisrelaatio on yleisesti

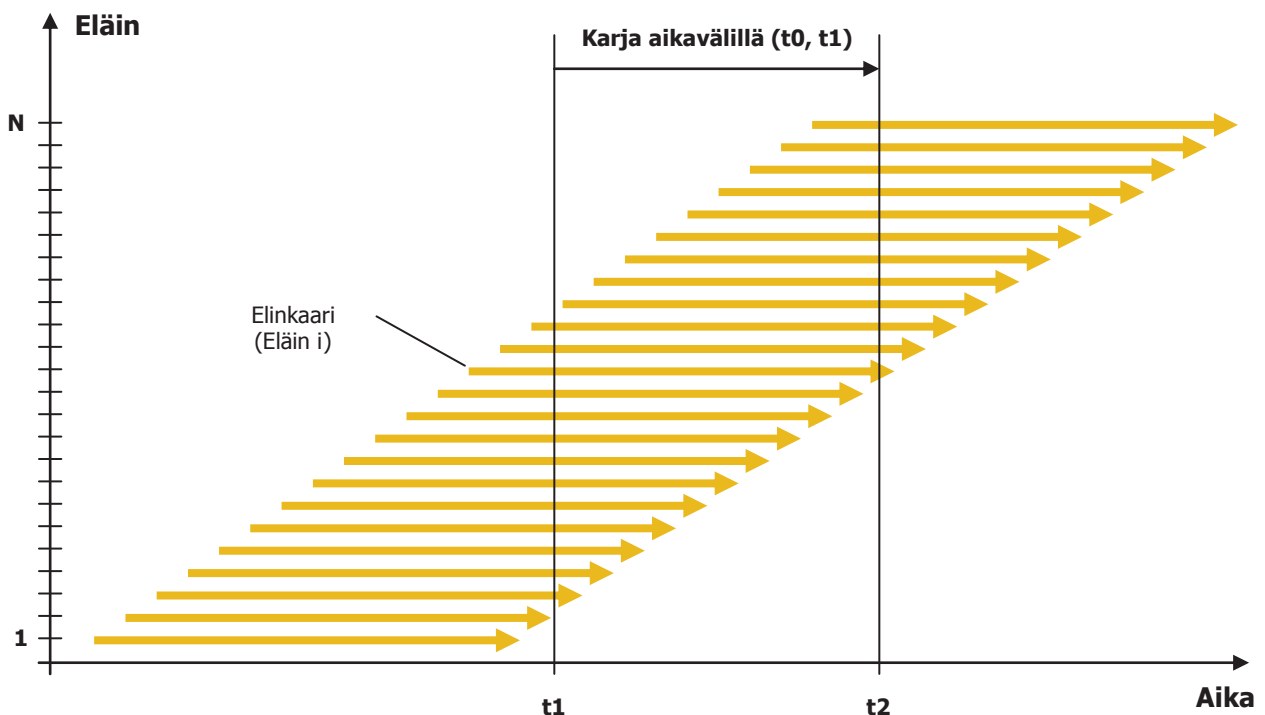
$$\dot{\mathbf{m}}_i(t) = \sum_j \dot{\mathbf{m}}_{i,j}(t - t_{o,j}), \quad i \in \{g, milk\} \quad (113)$$

missä  $\dot{m}_{i,j}(t-t_{o,j})$  ovat elinkaari-instanssin  $j$  kasvun ( $i = g$ ) ja maidon muodostumisen ( $i = milk$ ) ainevirrat ajanhetkellä  $t$  karjan elinkaareissa. Ainevirrat käsittävät sisään virtaavat rehut ja veden sekä ulos virtaavan sonnan ja virtsan sekä metaanipäästön ilmaan. Tarkempi kuvaus ainevirroista on luvussa 1.1.2. Perustoimintojen mallit.  $t-t_{o,j}$  on aika eläimen elinkaareissa, joka lasketaan eläimen syntymähetkestä  $t_{o,j}$  karjan elinkaaren aikajanalla. Relatio käsittää kaikki tilalla sikiövaiheessa olevat ja kaikki siellä olevat jo syntyneet eläimet.

### Hyödynnettyjen päätuotteiden ainevirtojen ominaismäärät

Karjan elinkaaresta voidaan raportointia ja analyysyjä varten ottaa näkymiä tuotantovuosittain tai useamman vuoden jaksolta raaka-maidon, lihan raaka-aineen ja toisiin karjoihin toimitettavien eläinten ainevirtatietojen tuottamiseksi sekä toiminnan itsearviointia että toimituksiin liittyvää ympäristövastuuviestintää varten. Vuosittaista näkymää voitaisiin pitää varsinkin lihan raaka-aineelle sopivimpana, koska se on toisaalta vielä hyvin ajan tasainen ja välittää tiedon tuotannon ekotehokkuudessa tapahtuneista muutoksista selvemmin kuin useamman vuoden keskiarvot. Tarvetta lyhemmän jakson näkymälle saattaa kuitenkin syntyä, esimerkiksi kun eläimiä siirretään toiselle tilalle, joka tarvitsee tiedon eläimille kertyneistä ainevirroista mahdollisimman nopeasti. Ajanjakson pituus riippuu tietotarpeista.

Seuraavassa tarkastellaan lypsykarjan päätuotteiden ainevirtakertymiä ja niiden ominaismääriä (kg/kg) valitun ajanjakson yli ulottuvassa näkymässä  $(t_0, t_1)$  (kuva 17). Näkymän alussa kaikki aiemmin hyödyntämättä jääneiden päätuotteiden ainevirtakertymät on jaettu hyödynnykseen menneille päätuotteille. Yhtälöissä  $t_{j,out}$  tarkoittaa eläimen  $j$  poistoajankohtaa karjan elinkaaren aikajanalla.



**Kuva 17.** Havainnollistus karjamallin näkymästä.

- **Kasvu**

Tarkastelujakson aikana poistuu kasvua lihan raaka-aineeksi määrä

$$\Delta m_{g,out,m} = \sum_j \int_{-\tau_j}^{t_{j,out}} \dot{m}_{g,j}(t) dt, \forall t_0 < t_{j,out} \leq t_1 \mid j \text{ lihan raaka -aineeksi} \quad (114)$$

ja toiselle tilalle jatkokasvatukseen määrä

$$\Delta m_{g,out,a} = \sum_j \int_{-\tau_j}^{t_{j,out}} \dot{m}_{g,j}(t) dt, \forall t_0 < t_{j,out} \leq t_1 \mid j \text{ eloon.} \quad (115)$$

Jätteen kasvusta päätyy määrä

$$\Delta m_{g,out,w} = \sum_j \int_{-\tau_j}^{t_{j,out}} \dot{m}_{g,j}(t) dt, \forall t_0 < t_{j,out} \leq t_1 \mid j \text{ ei voida hyödyntää.} \quad (116)$$

Näiden tuotannosta kertyneitä ainevirtoja siirtyy lihan raaka-aineen mukana määrä

$$\Delta \mathbf{m}_{g,out,m} = \sum_j \int_{-\tau_j}^{t_{j,out}} \dot{\mathbf{m}}_{g,j}(t) dt, \forall t_0 < t_{j,out} \leq t_1 \mid j \text{ lihan raaka -aineeksi} \quad (117)$$

ja toiselle tilalle jatkokasvatukseen määrä

$$\Delta \mathbf{m}_{g,out,a} = \sum_j \int_{-\tau_j}^{t_{j,out}} \dot{\mathbf{m}}_{g,j}(t) dt, \forall t_0 < t_{j,out} \leq t_1 \mid j \text{ eloon.} \quad (118)$$

Tilavarastoon jaettavaksi hyödynnettäville päätuotteille päättyy määrä

$$\Delta \mathbf{m}_{g,out,w} = \sum_j \int_{-\tau_j}^{t_{j,out}} \dot{\mathbf{m}}_{g,j}(t) dt, \forall t_0 < t_{j,out} \leq t_1 \mid j \text{ ei voida hyödyntää} \quad (119)$$

Kun jätteen menneen erän ainevirtakertymä jaetaan kokonaisuudessaan hyödynnettäväksi menneille erille ja jako tehdään tasaisesti koko kasvumassalle, saadaan ainevirtojen ominaismääräksi lihan raaka-aineeksi menneelle kasvulle

$$\mu'_{g,out,m} = \mu_{g,out,m} + \frac{1-\eta}{\eta} \mu_{g,out,w} \quad (120)$$

ja toiselle tilalle siirretyille eläimille

$$\mu'_{g,out,a} = \mu_{g,out,a} + \frac{1-\eta}{\eta} \mu_{g,out,w} \quad (121)$$

Näissä yhtälöissä

$$\eta = 1 - \frac{\Delta m_{g,out,w}}{\Delta m_{g,out,m} + \Delta m_{g,out,a} + \Delta m_{g,out,w}} \quad (122)$$

on hyödynnyksen hyötysuhde ja

$$\mu_{g,out,i} = \frac{1}{\Delta m_{g,out,i}} \Delta m_{g,out,i} \quad i \in \{m, a, w\} \quad (123)$$

ainevirran ominaismäärä, joita voidaan käyttää kasvun päätuotteen eli lihan raaka-aineen tuote-elinkaarimallissa

- **Maito**

Tarkastelujakson aikana muodostuu raaka-maitoa maidon raaka-aineeksi määrä

$$\Delta m_{milk,out,m} = \sum_j \int_{t_0}^{\min(t_1, t_{j,out})} \dot{m}_{milk,j}(t) dt, \quad \forall t_{j,out} > t_0 \mid j \text{ maidon raaka-aineeksi} \quad (124)$$

Hyödyntämättä jää määrä

$$\Delta m_{milk,out,w} = \sum_j \int_{t_0}^{\min(t_1, t_{j,out})} \dot{m}_{g,j}(t) dt, \quad \forall t_{j,out} > t_0 \mid j \text{ ei voida hyödyntää} \quad (125)$$

Näiden erien tuotannosta kertyneitä ainevirtoja siirtyy raaka-maidon mukana määrä

$$\Delta m_{milk,out,m} = \sum_j \int_{t_0}^{\min(t_1, t_{j,out})} \dot{m}_{milk,j}(t) dt, \quad \forall t_{j,out} > t_0 \mid j \text{ maidon raaka-aineeksi} \quad (126)$$

ja tilavarastoon jää siirrettäväksi hyödynnettävälle raaka-maidolle määrä

$$\Delta m_{milk,out,w} = \sum_j \int_{t_0}^{\min(t_1, t_{j,out})} \dot{m}_{g,j}(t) dt, \quad \forall t_{j,out} > t_0 \mid j \text{ ei voida hyödyntää} \quad (127)$$

Kun käytetään saamaa menetelmää kuin edellä kasvun tapauksessa, saadaan ainevirtojen ominaismääräksi raaka-aineeksi menneelle maidolle

$$\mu'_{milk,out,m} = \mu_{milk,out,m} + \frac{1-\eta}{\eta} \mu_{milk,out,w}, \text{ missä} \quad (128)$$

$$\eta = 1 - \frac{\Delta m_{milk,out,w}}{\Delta m_{milk,out,m} + \Delta m_{milk,out,w}} \quad (129)$$

on maidon hyödynnyksen hyötysuhde. Ainevirran ominaismäärää voidaan käyttää raaka-maidon tuote-elinkaarimallissa.

#### **4.3.9. Mallin verifiointi**

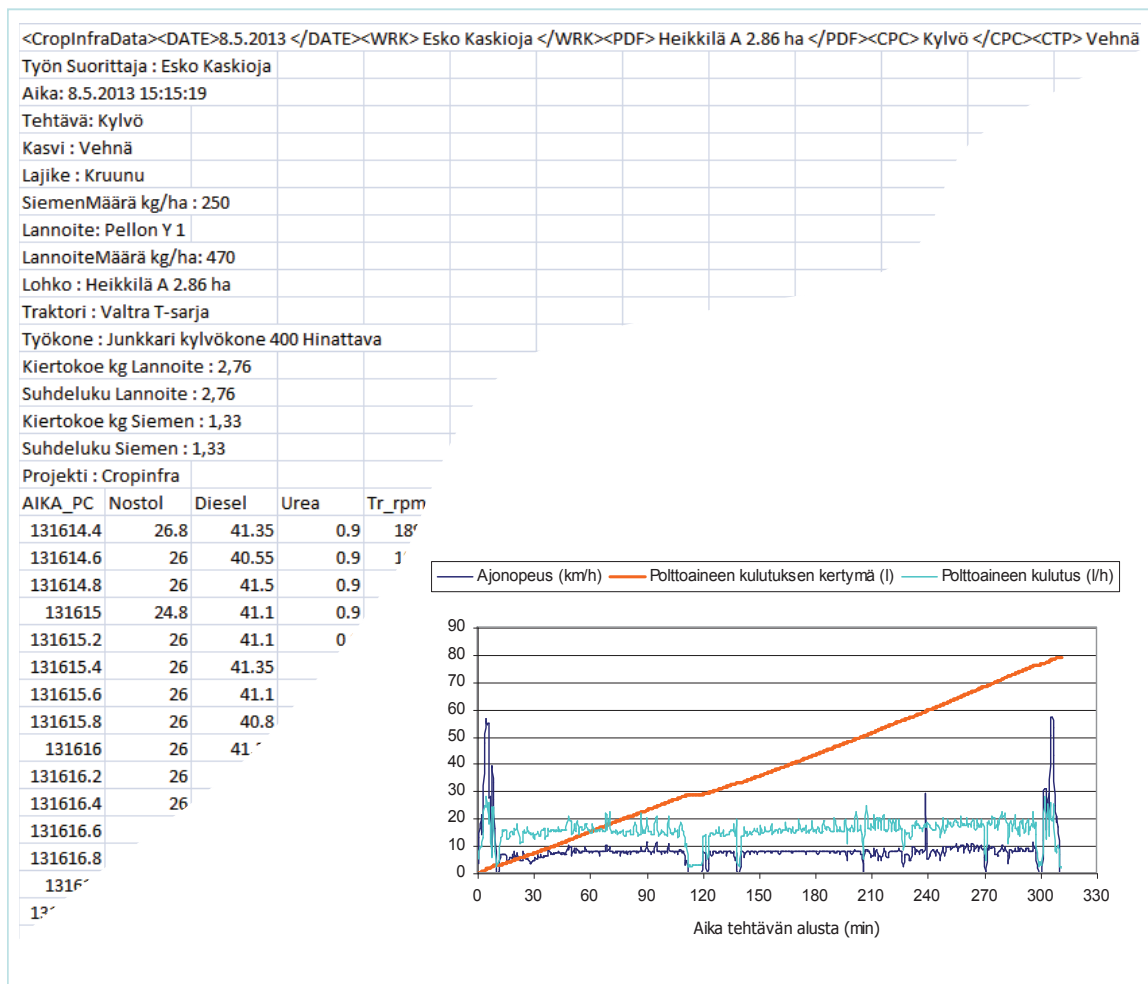
Malli kehitettiin ja sen toiminta pilotoitiin MTT Maaninnan navetan eläinten ruokintakoeaineistoja hyväksi käyttäen. Mallin antamia rehunkäyttöestimaatteja, jotka laskettiin ruokintakokeissa käytettyjä rehuseoksia ja niiden ominaisuuksia käyttäen, verrattiin ruokintakokeissa annosteltuihin määriin. Estimaatit vastasivat hyvin ruokintakokeiden rehumääriä. Lisäksi mallin antamia CH<sub>4</sub>-päästöjä verrattiin Suomen kansallisessa kasvihuonekaasuinventaariossa käytetyllä mallilla laskettuihin eläinkohtaisiin keskiarvoihin. Vuositason estimaatit vastasivat hyvin toisiaan. KHK - inventaariossa käytetyn mallissa märehtijöiden CH<sub>4</sub> -päästöjen laskentaan käytetyt yhtälöt on dokumentoitu kansallisessa inventaarioraportissa [9]. Tässä mallissa käytetään samoja perusyhtälöitä (72,73) Vertailujen perusteella mallia voidaan pitää luotettavana.



## 5. Tulokset ja niiden arviointi

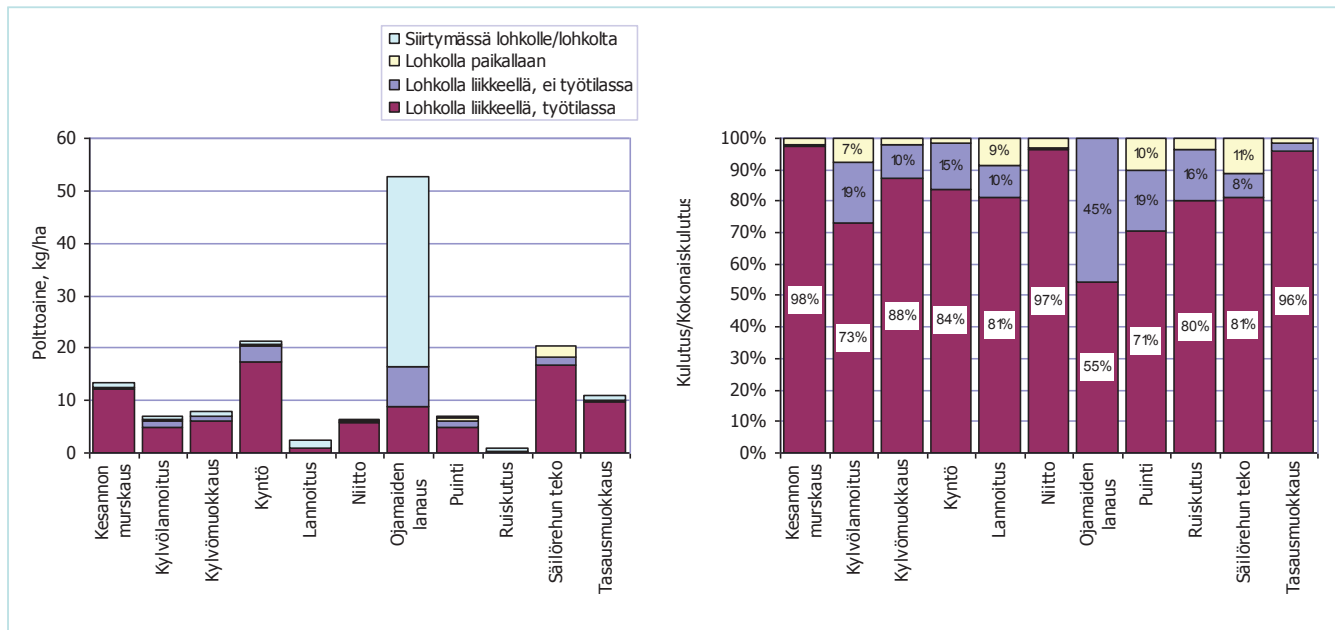
### Kasvintuotannon mallien kehittäminen

Osatehtävän päätulos on mittauksiin perustuva malli, jolla kasvintuotannon eri työvaiheiden todelliset polttoaineen ja sähköenergian kulutukset sekä viljelypanosten käyttö viedään tilan tuotteiden omiin elinkaarimalleihin. Konetyöprosessien tiedonkeruu toimii MTT:n teknologiatutkimuksessa kehittelyllä CropInfra-alustalla, jonka tietoteknistä yhteensopivuutta hierarkkisen mallinnuksen menetelmien kanssa parannettiin niin, että mittaustiedot voitiin ongelmattomammin hyödyntää relaatiomallissa. Kuivurin prosessimittauksiin ja tiedonkeruuseen suunniteltiin kokonaan uusi, CropInfra-alustalla toimiva järjestelmä, joka asennettiin Vakolan tilan kuivuriin. Järjestelmällä mitattiin kuivurin tilasta ja energiankulutuksesta eräkohtaisia aikasarjoja, joiden kautta viljan kuivaus liitettiin tilan elinkaarimalleihin. Mallin toiminta varmennettiin pilotoinnilla, joka toteutettiin MTT:n Vihdin Vakolan tilalla vuosina 2011- 2013 normaalin viljelyn yhteydessä kerättyjä mittaustietoja hyväksi käyttäen.



**Kuva 18.** Esimerkki kylvölannoituksen raakadatasta ja polttoaineenkulutuksesta.

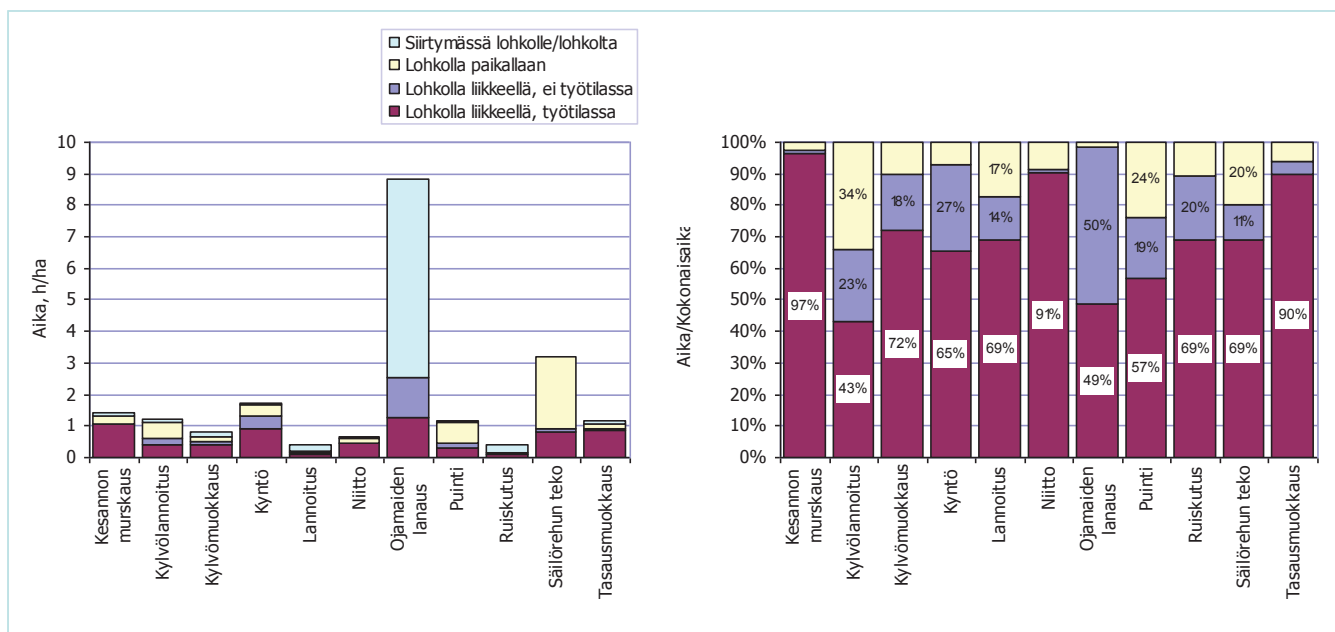
Pilotointi osoitti, että peltotyökoneiden ja viljan kuivurin polttoaineiden kulutukset sekä kuivurin sähköenergian kulutus pystytään mittaamaan tarkasti ja hyödyntämään kerätty mittaustieto tuotannon elinkaarimallissa. Järjestelmän toiminta on nyt teknisesti kohtuullisen luotettava, mutta käyttäjä-kone-liitynnässä ja tietologiikassa kentältä mallinnusjärjestelmän tietokantaan on vielä parannettavaa.



**Kuva 19.** Esimerkki peltotöiden polttoaineen kulutuksesta tehtävän eri vaiheissa ja loholla tehtävittäin.

Kuvassa 18 vasemmalla on esitetty otos kylvölannoituksen raakadatasta, josta voidaan laskea muun muassa kuvassa oikealla oleva polttoaineenkulutus työtehtävää kohden, kun maatilan pihalta on siirrytty pellolle, pellolla on toteutettu varsinainen työ ja työn jälkeen palattu takaisin maatilalle.

Kasvintuotannon prosessien panosten ja tuotosten määrittämisessä polttoaineen kulutuksella on suuri rooli. Kuvassa 19 vasemmalla on esitetty polttoaineen kulutus kasvintuotannon tehtävien siirtymä ja työvaiheissa hehtaaria kohden ja oikealla kulutuksen jakautuma kun toimitaan työvaiheen eri työtilassa loholla.



**Kuva 20.** Esimerkki peltotöiden ajan käytöstä tehtävän eri vaiheissa ja loholla tehtävittäin.

Kun maatilan tuotannon elinkaaritietoa lähdetään arvioimaan tuotantolinjoittain, pitäisi tuotannosta mitata kaikki työvaiheet, jotka koskevat arvioitavaa kohdetta. Yhtenä esimerkkinä kuvassa on

ojamaiden taseaus, joka korostuu kun polttoaineen kulutus lasketaan hehtaaria kohden, vaikkakaan kokonaislaskelmassa sen osuus ei ole merkittävää. Mittausdatasta oli mahdollista analysoida siirtymien, työkoneyhdistelmä paikallaan olon, varsinaisen peltotyön ja päistökäännösten/kone ylhäällä osuus polttoaineen kokonaiskulutuksesta. Tämän lisäksi datasta on mahdollisuus selvittää miten työaika jakautui työtehtävän sisällä (Kuva 19). Tietojen avulla olisi viljelijän mahdollista arvioida muun muassa omia koneketjujaan ja kehittää niiden mitoituksia.

Hankkeen aikana MTT Vakolan Cropinfra-tutkimusalueen lämminilmakuivuri, jonka koko on 190 hl ja polttimon teho 300 kW instrumentoitiin niin, tarvittavat elinkaaritiedot tuotantolinjaa koskeviin laskelmiin saatiin mitattua. Tavoitteena oli, että lohkolta puitavien kuivauserien polttoaineen ja sähköenergian kulutus pystyttiin mittaamaan ja tulokset oli mahdollista kohdentamaan tuotantolinjan laskelmiin. Päämuuttujien, jotka on kuvattu alla taulukossa 15, lisäksi kuivauserien kuivatuslämpötila, poistolämpötila, ilmamäärä ja ulkoilman lämpötila kosteus mitattiin. Seuraavassa on käsitelty vuoden 2012 ohra ja vehnän kuivauserien mittauksia, joita oli yhteensä 25 kappaletta.

Kuivurimittausten perusteella polttoaineen kulutuksen loppukuiva-ainemassaa kohden (MJ/kg KA) selittää vahvimmin ( $R^2 = 88 \%$ ) veden poisto (kg/kg KA). Kuvassa 21 vasemmalla on esitetty polttoainetta koskeva mittaustulos vuodelta 2012. Samassa kuvassa oikealla on sähkön kulutus loppukuiva-ainemassaa kohden (kWh/kg KA), jota selittää myös vahvimmin ( $R^2 = 76 \%$ ) veden poisto (kg/kg KA). Molemmista tarkasteluissa myös kuivauserän alkukosteus oli lähes yhtä vahva selittäjä. Kuivuriin syötetyn viljan kuiva-aineesta arvioitiin painomittausten perusteella olleen noin 4.8 % roskaa. Mittausten perusteella viljalajilla (ohra, vehnä) ei ollut vaikutusta polttoaineen kulutukseen. Mittauksissa tarkasteltiin myös eräkohtaista kuivausaikaa. Mittausten perusteella myös kuivausaikaa (h) selittää vahvimmin ( $R^2 = 73 \%$ ) veden poisto (kg/kg KA).

**Taulukko 15.** Viljan kuivauksen mittausten yhteenveto.

**Päämuuttujat:**

Lohko  
Kasvi  
AlkuKosteus(%)  
LoppuKosteus(%)  
Alkupaino(kg)  
Loppupaino(kg)  
Polttoaine(kg)  
Sähköenergia(kWh)  
Kuivausaika(h)

**Mittattu kuivauseriä: 25**

**Kasvit:** Ohra ja Vehnä

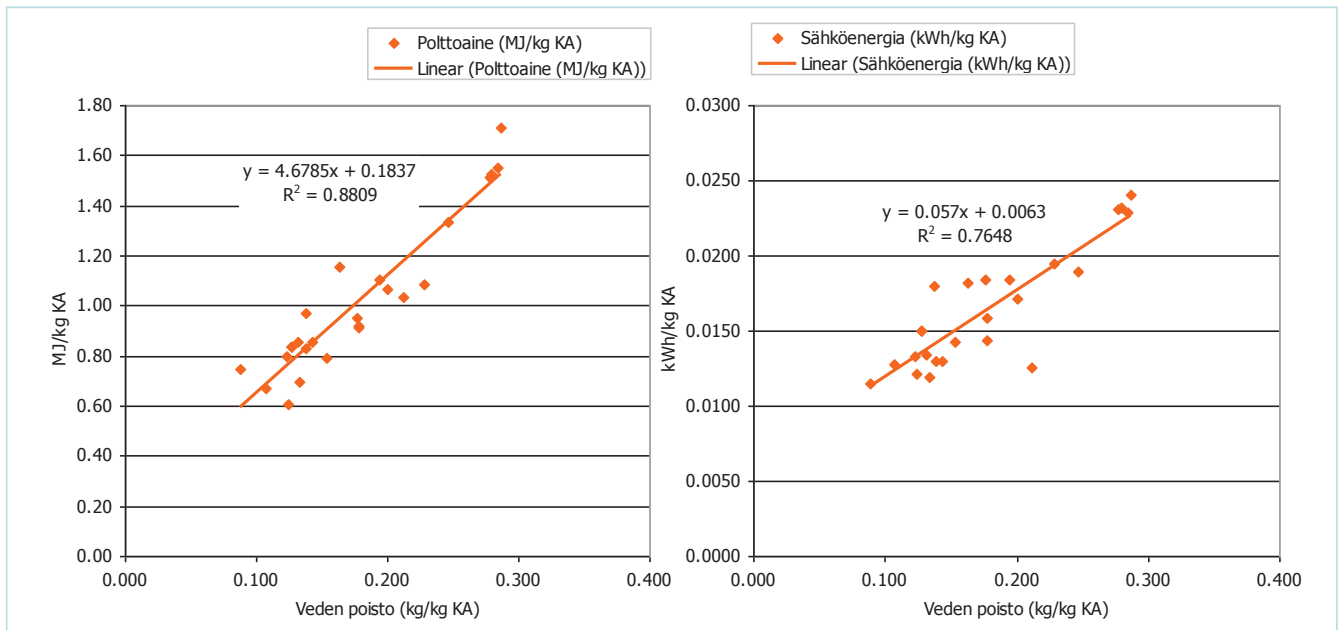
**Mittausvuosi:** 2012

**Alkukosteus:**

Minimi 18.50%  
Maksimi 29.30%  
Keskiarvo 23.4%  
Keskihajonta 3.32%

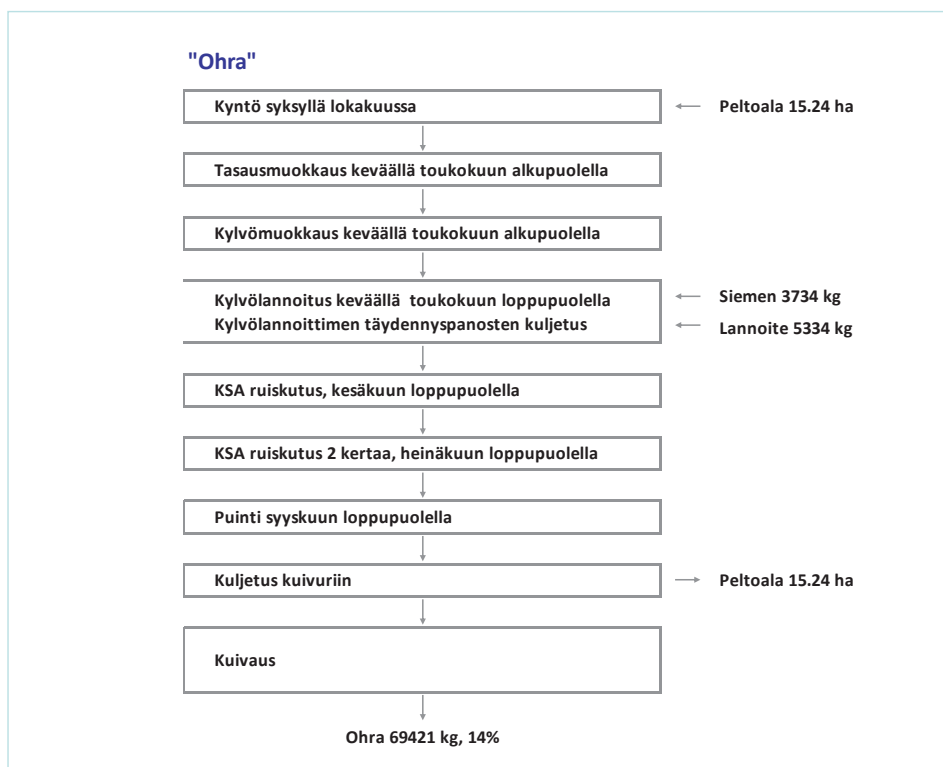
**Loppukosteus:**

Minimi 11.40%  
Maksimi 13.40%  
Keskiarvo 12.1%  
Keskihajonta 0.49%



**Kuva 21.** Viljan kuivauksen mittauksen tulokset polttoaineen kulutuksen ja sähkön kulutuksen osalta suhteutettuna vedenpoistoon.

HierarchyNet-hankkeessa tarkasteltiin kasvintuotannon eri tuotantolinjoja. Seuraavassa on esimerkki Ohran tuotannosta 15,24 hehtaarin kokoisella loholla Cropinfra-tutkimusalueella. Kuvassa 22 on esitetty tuotantolinjan perustapahtumat, joista tuotannon elinkaaritiedot mitattiin paikkakohtaisesti. Elinkaaritietojen kerääminen aloitettiin syksyllä 2011, kun lohko kynnettiin neljäsiipisellä paluauralla traktorin ollessa Valtra Direct T183.



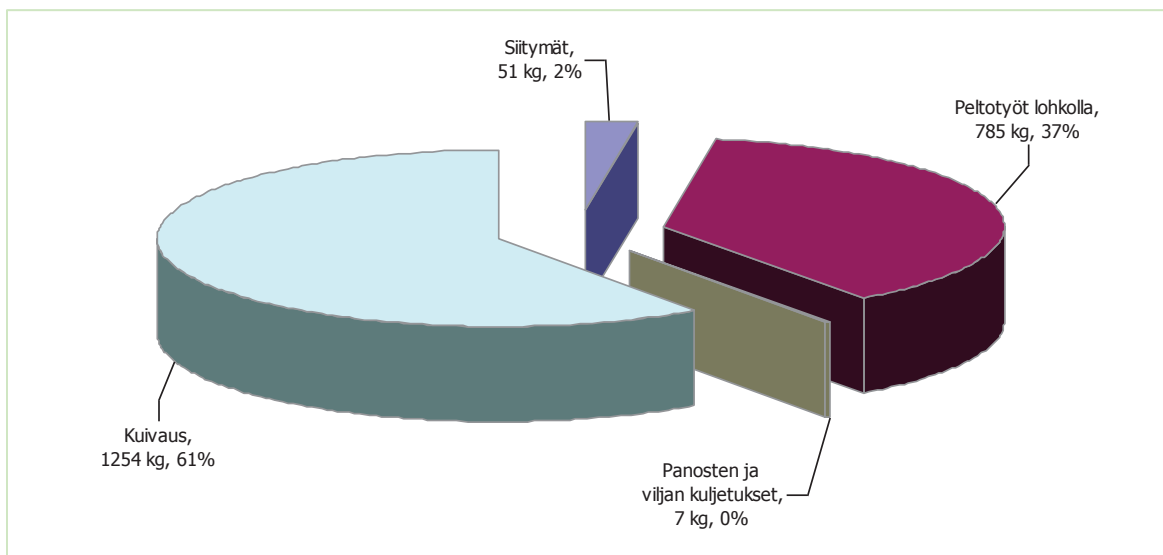
**Kuva 22.** Maatilan toiminta koostuu eri tuotantolinjoista, joista ohran tuotanto oli yhtenä HierarchyNet-hankkeen arviointikohteena.

Kevään 2012 kylvöt toteutettiin Valtra Direct T202 traktorilla ja Junkkari Maestro 4000 kylvölannoittimella (Kuva 23 vasemmalla). Ruiskutuksissa käytettiin Valtra 8400 ja Hardi twin 1200 työkoneyhdistelmää ja puinti tehtiin Sampo Rosenlew 2055 puimurilla, jossa oli Fieldstar sadon mittaussysteemi. Ennen kuin pellolta siirrettävä viljakuorma kipattiin kuivurin kaatosuppiloon, jokainen kuorma punnittiin. Kuvassa 23 oikealla on esitetty kuivurin vieressä olevasta mittaussysteimestä käyttöliittymä, jonka näytössä näkyy kuvaushetkellä traktori-peräkärry - yhdistelmän kokonaispaino peräkärryn ollessa täynnä viljaa.

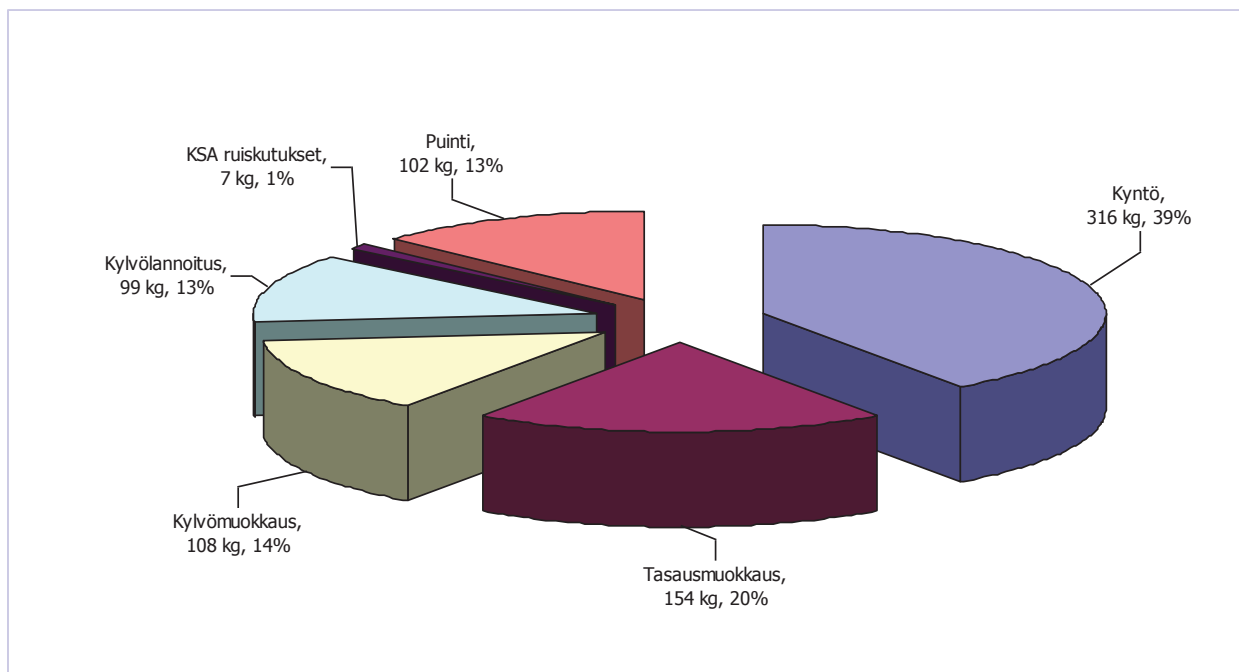


**Kuva 23.** Kylvöt vuonna 2012 toteutettiin Valtra Direct T202 traktorilla ja Junkkari Maestro 4000 kylvölannoittimella (vasemmalla). Puintikauden aikana, kuivattava viljamäärä punnittiin ennen kuin peräkärryt tyhjennettiin kuivurin kaatosuppiloon (oikealla).

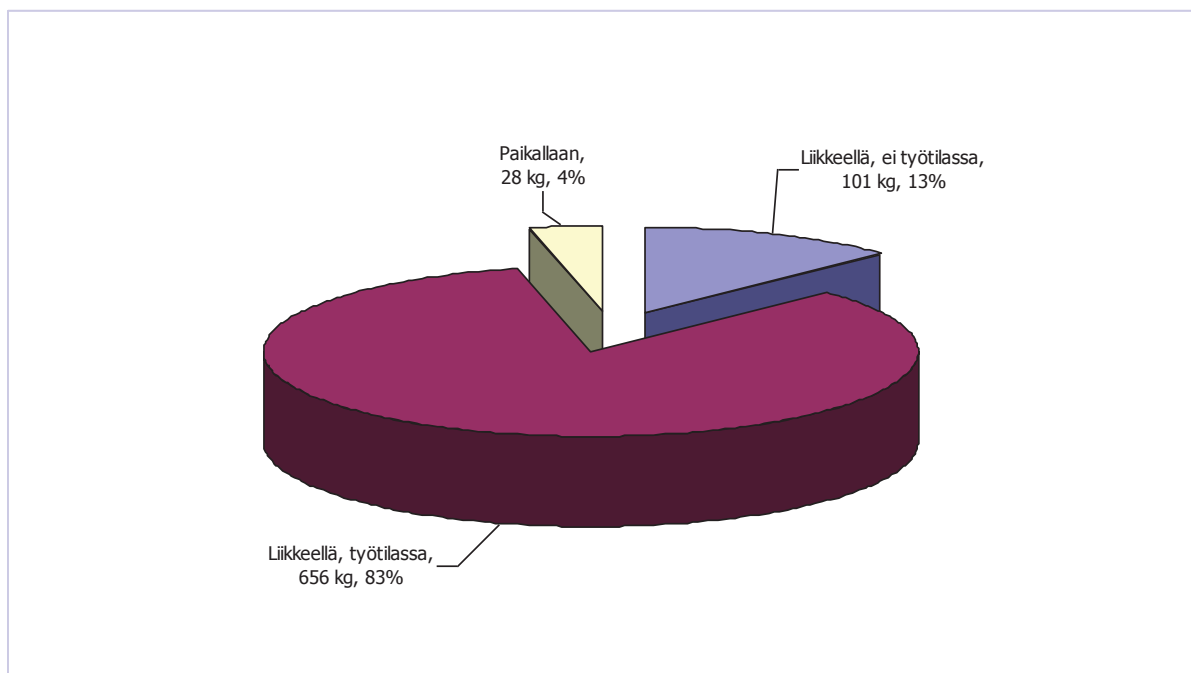
Tuotantolinjan mallilla laskettujen kokonaiskulutusten määrät olivat 2097 kg polttoainetta ja 906 kWh sähköä. Kaikki sähkö kului kuivauksessa. Kuvissa 24, 25 ja 26 esitetyt polttoaineen kulutuksen jakautumat antavat esimakua siitä, miten monin eri tavoin viljelijä voi mallilla tarkastella tuotantolinjan tulosta arvioidakseen tuotantolinjan työsuorituksen onnistumista, parantamiskohteita ja -mahdollisuuksia.



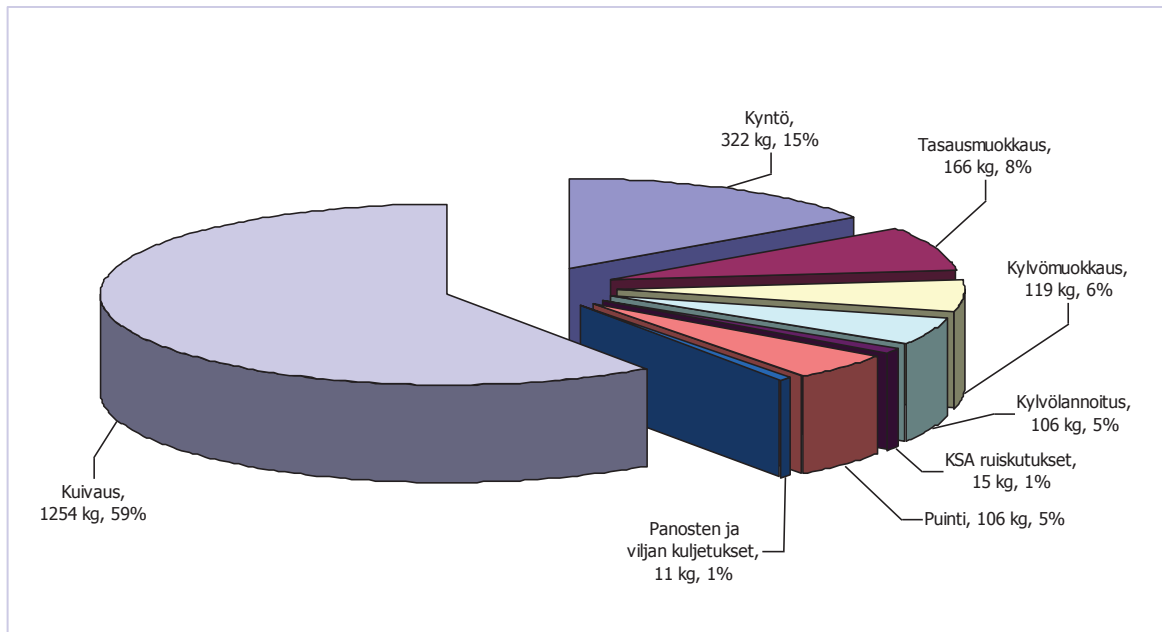
**Kuva 24.** Polttoaineen kulutuksen jakautuminen peltotöiden, panosten ja viljan kuljetusten, kuivauksen ja siirtymien kesken (Yhteensä 2097 kg).



**Kuva 25.** Peltotöiden polttoaineen kulutus lohkolla tehtävittäin (Yhteensä 785 kg).

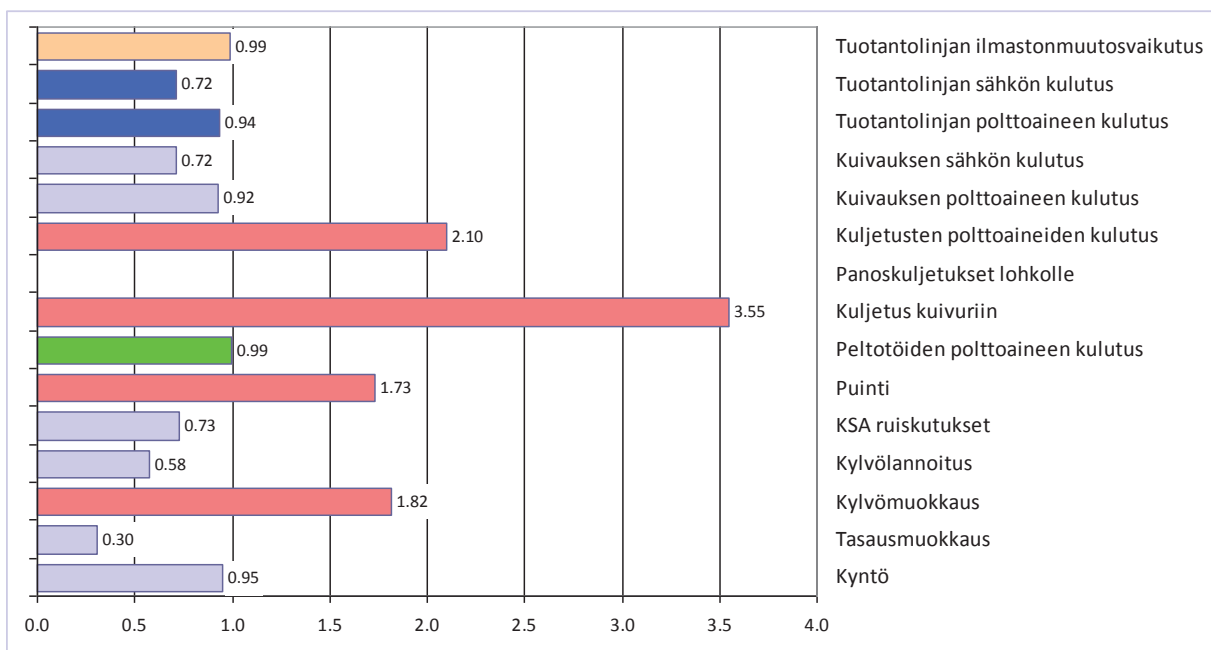


**Kuva 26.** Peltotöiden polttoaineen kulutus lohkolla eri tiloissa (Yhteensä 785 kg).



**Kuva 27.** Polttoaineen kulutus tuotantolinjassa elinkaaren vaiheittain (Yhteensä 2097 kg).

Jotta saataisiin selville, miten nykyisin elinkaariarvioinneissa käytetyt peltotyöprosessien mallit suhtautuvat mitatuista arvoista johdettuihin malleihin, tehtiin vertailulaskelma ohran tuotantolinjasta nykyisillä prosessimalleilla ja mitatuista arvoista johdettuja malleja käyttäen. Mitattu polttoaineen kulutus tuotantolinjassa elinkaaren vaiheittain ilmenee kuvasta 27 ja vertailun tulos kuvasta 28. Vertailu on esitetty nykyisillä malleilla laskettujen arvojen suhteena mittausperusteisilla laskettuihin arvoihin. Yli yhden menevä arvo merkitsee sitä, että nykyisillä malleilla laskettu arvo on suurempi ja alle yhden jäävä arvo sitä, että nykyisillä malleilla laskettu arvo on pienempi kuin mittausperusteisilla malleilla laskettu.



**Kuva 28.** Nykyisillä elinkaaritiedoilla lasketun polttoaineen ja sähköenergian kulutuksen suhde vastaaviin mitattuihin arvoihin kulutuserittäin. Mukana myös ilmastonmuutosvaikutuksen arvio nykyisillä tiedoilla laskettuna suhteessa mitatuilla tiedoilla laskettuun.



Elinkaaren vaiheiden kulutuksissa havaitaan suuria eroja sekä pienempään että suurempaan suuntaan. Esimerkiksi kylvölannoituksen ja tasausmuokkausten nykyiset mallit ennustavat huomattavasti mitattua pienemmän kulutuksen ja kylvömuokkaus sekä puinti taas huomattavasti suuremman kulutuksen. Erot syntyvät erilaisista työajan käytön ja keskitehon arvoista. Erojen syitä ei voida kuitenkaan osoittaa. Peltotöiden polttoaineen kokonaiskulutukset osuvat kuitenkin hyvin yksiin. Syytä sille, mistä tämä mahdollisesti johtuu, ei tässäkään tapauksessa voida varmuudella osoittaa. Sillä perusteella, että tehtävien mitatuissa ominaiskulutuksissa ilmeni suuri hajonta, voisi syyksi epäillä sattumaa.

Nykyisen kuivauksen mallin antama arvio polttoaineen kulutukselle on suhteellisen lähellä mitattua. Sähkön käytön arvio sitä vastoin on huomattavasti mitattua pienempi. Tässäkään ei kuitenkaan voida varmuudella sanoa, mitkä seikat tilanteen aiheuttavat. Voidaan vain todeta se, että kuivurin nykymallissa on sähkön ja polttoaineen kulutuksella erilainen suhde kuin mitatussa kuivurissa.

Vertailuun otettiin mukaan myös tuotantolinjan ilmastonmuutosvaikutus, kansanomaisesti ilmaistuna ”hiilijalanjälki”. Tuotantolinjan aiheuttaman, mittauksiin perustuen arvioitun ilmastonmuutosvaikutuksen kokonaismäärä oli 23682 kg CO<sub>2</sub> eq. Siinä ei ilmennyt merkittävää eroa nykyisillä malleilla lasketun ja mittauksiin perustuvilla malleilla lasketun välillä. Tämä johtuu osittain edellä tarkasteltujen polttoaineen kulutusten pienistä eroista, osittain siitä, että kuivauksen sähköenergian kulutus on pieni verrattuna polttoaineen kulutukseen, ja merkittävältä osin siitä, että noin 74 % tuotantolinjan ilmastonmuutosvaikutuksesta aiheutuu lohkolta suoraan ja epäsuorasti syntyvistä dityypiksiidipäästöistä ja kalkista neutraloitumisessa vapautuvasta hiilidioksidista. Ohralohkolla ei mitattuna viljelykautena tehty kalkitusta, joten tälle käytettiin keskiarvoa 733 kg/ha, joka vastaa 5000 kg/ha kalkkia levitettynä joka seitsemäs vuosi. N<sub>2</sub>O:n arvioinnissa käytettiin mittaukseen perustuvaa typen määrää 90 kg/ha.

### • Tehtävien yksikkökulutuksen mallit

Hankkeen aikana Cropinfra-alustalla toteutettiin prosessidatan mittaus ja keräys luvussa 4.1.2 esitettyjen järjestelmien ja menetelmien avulla seuraavista työvaiheista:

Kesannon murskaus	Puinti
Kylvölannoitus	Ruiskutus
Kylvömuokkaus	Säilörehun teko
Kyntö	Tasausmuokkaus
Lannoitus	Panoskuljetus lohkolle
Niitto	Viljan kuljetus kuivuriin
Ojamaiden lanaus	Viljan maantiekuljetus

Peltotyötehtävistä mitattiin lisäksi siirtymäajot lohkolle mentäessä ja sieltä palattaessa.

Seuraavassa esitetään mittausten tuloksina saadut yksikkökulutusmallit peltotöille, viljan kuivaukselle, perävaunukuljetuksille ja siirtoajolle. Niitä voi tietysti varauksin käyttää kasvintuotannon mallien lähtötietoina yleistetyissä tuote-elinkaarimalleissa. Käytettäessä on kuitenkin otettava huomioon, että aineisto on kerätty yhdeltä tilalta, joka on lisäksi tutkimustila. Myös se seikka on syytä huomioida, että aineisto, josta tulokset on johdettu, on melko suppea.

Mitatuissa peltotöissä (79 kappaletta) polttoaineen kokonaiskeskikulutus (työskentely lohkolle ja siirtymät yhdessä) vaihteli tehtävittäin 0.8 - 52.7 kg toimenpidehehtaaria kohden. Pienin kulutus ilmeni

## *HierarchyNet -loppuraportti*

kasvinsuojeluaineiden ruiskutuksessa ja suurin ojamaiden lanauksessa. Ojamaiden lanauksen poikkeuksellisen suureen arvoon vaikuttaa pitkä siirtymä suhteessa toimenpidealaan (87 km/toimenpide-ha). Ojamaiden lanauksen jälkeen suurimmat kokonaiskulutukset ilmenivät kynnessä (21.2 kg/toimenpide-ha) ja säilörehun teossa (20.5 kg/toimenpide-ha, ei sisällä siirtymäajoja).

Siirtymiin lohkolle ja lohkolta pois kului 2.2%:sta 68.9%:iin polttoaineesta. Pienimmillään osuus oli kynnessä (2.2%) ja niitossa (2.8%) ja suurimmillaan ojamaiden lanauksessa (68.9%), lannoituksessa (53.9%) ja ruiskutuksessa (42.9%). Siirtymien kulutusosuus riippuu likimain ( $R^2 = 0.9073$ ) siirtymämatkan ja lohkolle käytetyn polttoaineen suhteesta kaavan  $y = 0.1169x + 0.0616$ , missä siis  $y$  on siirtymien kulutusosuus ja  $x$  siirtymämatkan ja lohkolle kuluvan polttoainemäärän suhde (km/kg lohkolle). Vaikka siirtymämatkojen yhteenlaskettu pituus selittääkin tämän mukaan suurimman osan siirtymien polttoaineen kulutuksesta, vaikuttaa siihen myös moni muu tekijä, kuten ajotapa ja ajoreitin ominaisuudet. Polttoaineen kulutuksen keskihajonnat vaihtelivat alueessa 33 % - 238 % keskiarvosta suurimpien hajontojen esiintyessä niitossa ja puinnissa, 238 % ja 180 %, ja pienimpien tasausmuokkauksessa ja kesannon murskauksessa, 33 % ja 49 %.

### *Peltotyöt*

Peltotöiden keskimääräiset polttoaineen yksikkökulutukset (kg/ha) ilmenevät taulukosta 16. Työtilan keskikulutus vaihteli tehtävittäin alueessa 0.4 - 17.3 kg/toimenpide-ha. Pienin arvo tavattiin tässäkin KSA -ruiskutuksessa. Suurin arvo taas esiintyi kynnessä. Lähellä kyntöä olivat säilörehun teko (16.7 kg/toimenpide-ha) ja kesannon murskaus (12.2 kg/toimenpide-ha).

Työtilan polttoaineen kulutuksen keskihajonnat ovat 9 % - 37 % keskiarvosta, mitä voidaan pitää pienenä ottaen huomioon, että kulutukseen vaikuttaa moni tekijä. Poikkeuksen tekee KSA -ruiskutus, jossa keskihajonta on 1.3 kertaa keskiarvon suuruinen. Suuri suhteellinen hajonta on ruiskutuksessa osittain seurausta siitä, että on ruiskutettu tarpeen mukaan, jolloin ruiskutettu alue on joko jäänyt kohdealuetta pienemmäksi tai päätynyt sitä suuremmaksi ja tämän seurauksena polttoaineen hehtaarikulutukseen on tullut vaihtelua. Tätä samaa vaihtelua ilmenee jossain määrin myös pinalannoituksen ja kylvömuokkauksen polttoaineen kulutuksissa, joiden hajonnat ovat kaksi seuraavaksi suurinta ruiskutuksen jälkeen (37 % ja 31 %).

Lohkolla liikkuminen työkonetta siirtotilassa, eli ei-työtilassa, edustaa mitatuissa tapauksissa 0.3 % - 18.1 % polttoaineen kokonaiskulutuksesta. Pienimmillään tämä erä on niitossa ja kesannon murskauksessa (0.3 % ja 0.4 %) ja suurimmillaan puinnissa ja kylvölannoituksessa (18.1 % ja 17.5 %). Polttoaineen kulutuksen keskihajonnat vaihtelevat alueessa 40 % - 142 % keskiarvosta. Suurimmat hajonnat esiintyvät ruiskutuksessa ja kylvömuokkauksessa, 142 % ja 125 %, ja pienimmät kylvölannoituksessa ja kesannon murskauksessa, 40 % ja 46 %. Suurimpien hajontojen taustalla on samoja syitä kuin työtilassa.

Lohkolla paikallaan oloa moottorin käydessä kului mitatuissa tapauksissa 1.3 % - 11.1 % polttoaineesta. Pienimmillään osuus oli niitossa ja kesannon murskauksessa (0.3 % ja 0.4 %) ja suurimmillaan puinnissa ja kylvölannoituksessa (18.1 % ja 17.5 %). Polttoaineen kulutuksen keskihajonnat vaihtelivat alueessa 48 % - 207 % keskiarvosta. Suurimmat hajonnat esiintyivät kynnessä ja säilörehun teossa, 207 % ja 168 %, ja pienimmät kylvölannoituksessa ja puinnissa, 48 % ja 54 %.

**Taulukko 16.** Peltotöiden keskimääräiset mitatut polttoaineen yksikkökulutukset (kg/ha).

## HierarchyNet -loppuraportti

Tehtävä	Polttoaineen kulutus lohkolla, kg/ha			
	Lohkolla liikkeellä, ei työtilassa	Lohkolla liikkeellä, työtilassa	Lohkolla paikallaan	Lohkolla kaikkiaan
Kesannon murskaus	0.05	12.21	0.24	12.5
Kylvölannoitus	1.24	4.75	0.49	6.5
Kylvömuokkaus	0.73	6.20	0.15	7.1
Kyntö	3.04	17.34	0.36	20.7
Lannoitus	0.10	0.86	0.09	1.1
Niitto	0.02	5.90	0.19	6.1
Ojamaiden lanaus	7.46	8.95	0.00	16.4
Puinti	1.26	4.73	0.69	6.7
Ruiskutus	0.07	0.35	0.02	0.4
Säilörehun teko	1.61	16.66	2.28	20.5
Tasausmuokkaus	0.25	9.69	0.15	10.1

### Viljan kuivaus

Viljan kuivauksen keskimääräiset mitatut polttoaineen ja sähköenergian yksikkökulutukset 14 % loppukosteudessa olevaa viljaa kohden ilmenevät taulukosta 16. Mitatuissa kuivauserissä oli mukana ohraa ja vehnää. Keskihajonta oli polttoaineen kulutuksessa 34 % ja sähköenergian kulutuksessa, 28 %. Kasvilajilla ei ollut mittausten perusteella vaikutusta polttoaineen eikä sähköenergian kulutukseen. Veden poisto tuotteen kuiva-ainetta kohden selittää hajontoja vahvasti, kuten edellä todettiin. Jos veden poisto tunnetaan, saa yhtälöistä

$$H \approx 4.6785\Delta'_{H_2O} + 0.1837(\text{MJ/kg KA}) \quad (130)$$

$$E \approx 0.057\Delta'_{H_2O} + 0.0063(\text{kWh/kg KA}) \quad (131)$$

hyvän estimaatin polttoaineen palamisentalpian,  $H$  ja sähköenergian  $E$  kulutukselle.  $\Delta'_{H_2O}$  on veden poisto kuiva-ainetta kohden (kg  $H_2O$ /kg KA).

### Taulukko 17.

Viljan kuivaus

Tehtävä	Energian kulutus kuivauksessa	
	Polttoaine (g/kg 14%)	Sähköenergia (Wh/kg 14 %)
Viljan kuivaus	20.39	13.81

### Perävaunukuljetukset

## HierarchyNet -loppuraportti

Mitattuja kuljetuksia oli kaikkiaan 18, jotka jakautuivat seuraavasti: panoskuljetukset lohkolle 1, viljan kuljetus kuivuriin 12, viljan maantiekuljetukset 5. Keskiarvoon suhteutettu ominaiskulutuksen (kg/t<sub>nk</sub>m) keskihajonta oli viljan maantiekuljetuksissa 5 % ja muissa kuljetuksissa 98 %. Keskikulutusten (kg/km) keskihajonnat olivat kuormattuna ajolle vastaavasti 12 % ja 20 % sekä tyhjänä ajolle 1 % ja 33 %. Viljan maantiekuljetuksissa kuorman tilavuus oli aina likimain sama ja painon keskihajonta alle 2 % keskiarvosta. Muissa kuljetuksissa keskihajonta oli 46 %.

Kuljetussuoritteiden keskihajonta oli viljan maantiekuljetuksissa 5 % ja muissa 98 %. Viljan maantiekuljetuksissa ajomatkan (km) keskihajonta oli kuormattuna ajolle 5 % ja tyhjänä ajolle 45 % keskiarvosta ja muissa kuljetuksissa vastaavasti 98 % ja 88 %.

Keskinopeus oli viljan maantiekuljetuksissa 38.8 km/h, panoskuljetuksissa 19.8 km/h ja viljan kuljetuksissa kuivuriin 18.7 km/h. Keskihajonta oli maantiekuljetuksissa 18 % ja muissa kuljetuksissa 23 % keskinopeudesta.

Perävaunu oli kaikissa tapauksissa sama. Traktorina käytettiin Valtra 8950 ja T-sarjan traktoreita. Kuljettajina toimi neljä eri henkilöä. Maantiekuljetusten menomatka ajettiin käytännössä aina ja paluumatkakin pääosin samaa reittiä. Muissa tapauksissa reitit vaihtelivat pituudeltaan ja ominaisuuksiltaan. Tyhjänä ajoon sisältyy lisäksi kokonaisuudessaan paikallaan olo koneen käydessä.

Perävaunukuljetusten keskimääräiset yksikkökulutukset (kg/km) ilmenevät taulukosta 18. Kuvassa 29 on annettu yhtälö yksikkökulutuksen arvioimiseksi kuljetussuoritetta kohden (kg/t<sub>nk</sub>m). Yhtälössä esiintyvien kilometrikulutuspäätien  $m'_Q$  ja  $m'_0$  mittauksiin perustuvat arvot on annettu kuvan 30 taulukossa. Kuljetusmatka tyhjänä,  $s_0$  ja kuormattuna,  $s_Q$  sekä kuorma,  $Q$  ovat yhtälön muuttujat. Kun kuljetustapauksesta tunnetaan näiden arvot, ominaiskulutus (kg/t<sub>nk</sub>m) saadaan sijoittamalla ne kuvan 29 yhtälöön.

**Taulukko 18.** Perävaunukuljetusten keskimääräiset mitatut polttoaineen yksikkökulutukset (kg/km), kuljetusmatkat, kuormat ja kuljetussuoritteet.

Tehtävä	Kuljetus Polttoaine kg/km	Matka, km	Kuorma, tn	Kuljetussuorite, tnkm
Panoskuljetus lohkolle	0.41	5.27	3.25	8.6
Viljan kuljetus kuivuriin	0.57	5.27	10.60	27.9
Viljan maantiekuljetus	0.36	72.50	11.07	437.0

**Polttoaineen kulutus kuljetussuoritetta kohden (  $m''$  )**

$$m'' = \frac{m}{Q \times s_Q} = \frac{m'_Q}{Q} + \frac{m'_0}{Q} \times \frac{s_0}{s_Q}$$

missä

- $m$  = kulutus (kg) kuljetustehtävässä yhteensä  
(kuormattuna lastauspaikalta toimituspaikkaan ja  
siirtymät tyhjänä)
- $Q \times s_Q$  = kuljetussuorite (tnkm) matkalla lastauspaikalta toimituspaikkaan
- $m'_Q$  = kulutus (kg/km) kuljetuksessa (kuormattuna)
- $m'_0$  = kulutus (kg/km) siirtymässä (tyhjänä)
- $s_Q$  = kuljetusmatka (km) (kuormattuna)
- $s_0$  = siirtymämatka (km) (tyhjänä)
- $Q$  = kuorma (tn)

**Kuva 29.** Mittaustiedoista johdettu yhtälö perävaunukuljetuksen polttoaineen kulutukselle kuljetussuoritetta kohden (  $m''$  , kg/tnkm).

Muuttuja		Panoskuljetus lohkolle	Viljan kuljetus kuivuriin	Viljan maantiekuljetus
$m''$	kg/tnkm	<b>0.255</b>	<b>0.133</b>	<b>0.075</b>
$Q \times s_Q$	tnkm	25.4	57.3	437.0
$m'_Q$	kg/km	<b>0.46</b>	<b>0.59</b>	<b>0.40</b>
$m'_0$	kg/km	<b>0.37</b>	<b>0.55</b>	<b>0.32</b>
$s_Q$	km	7.8	5.4	39.5
$s_0$	km	7.8	4.2	43.4
$Q$	tn	3.3	10.6	11.1

**Kuva 30.** Parametrien ja muuttujien keskiarvot perävaunukuljetuksen polttoaineen kulutuksen ominaisarvon yhtälöön kuvassa 29.

*Siirtymät*

Mitatuissa siirtymäajoissa (84 kappaletta, tehtävien yhteydessä kirjattu 45, erikseen 39) matkan (meno ja paluu yhdessä) pituus oli keskimäärin 5.3 kilometriä ja siihen käytetty aika 20 minuuttia.

Liikkumiseen aikaa käytettiin keskimäärin 14 minuuttia ja paikallaan oloon 6 minuuttia. Keskinopeus liikkeellä oltaessa oli 22.7 kilometriä tunnissa. Polttoaineen ominaiskulutus oli kaikkiaan 0.472 kg/km. 85 % tästä muodostui liikkeellä oltaessa ja 15 % paikallaan oltaessa. Ominaiskulutuksen keskihajonta oli 65 % keskiarvosta kaikkiaan (liikkeellä ja paikallaan), liikkeellä oltaessa vastaavasti 44 % ja paikallaan oltaessa 295 %. Siirtymäajan matkan pituuden keskihajonta oli 130 % keskiarvosta ja liikkeelläolajan 90 %.

Perävaunukuljetusten keskimääräiset yksikkökulutukset (kg/km) ilmenevät taulukosta 19.

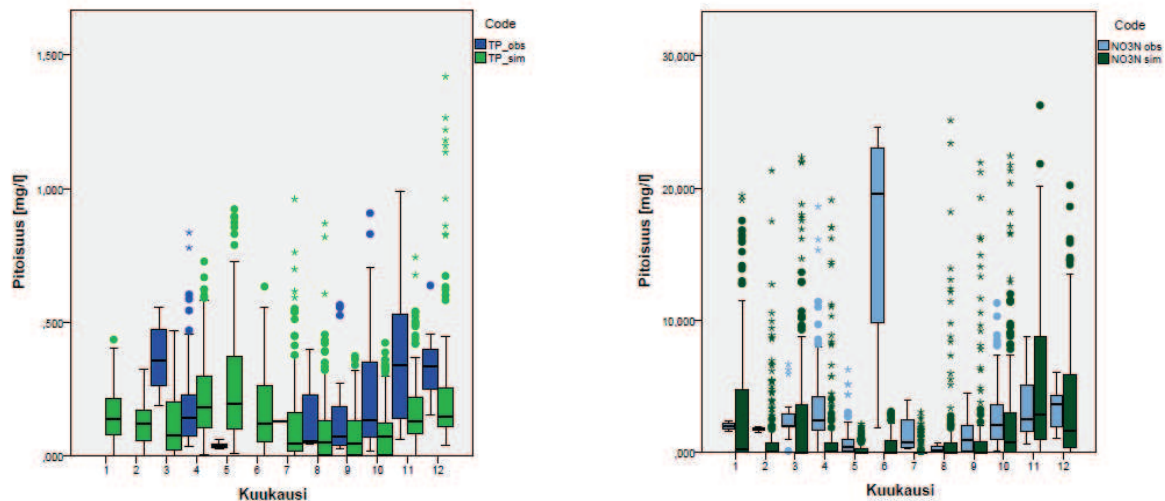
**Taulukko 19.** Siirtymien keskimääräiset mitatut matkat ja polttoaineen yksikkökulutukset (kg/km liikkeellä ja paikallaan oltaessa sekä yhteensä).

Tehtävä	Siirtymä			
	Matka, km/kpl	Polttoaine liikkeellä, kg/km	Polttoaine paikallaan, kg/km	Polttoaine yhteensä, kg/km
Kesannon murskaus	10.83	0.31	0.06	0.38
Kylvölannoitus	3.77	0.46	0.03	0.49
Kylvömuokkaus	4.74	0.43	0.17	0.60
Kyntö	5.03	0.41	0.02	0.43
Ojamaiden lanaus	14.78	0.39	0.02	0.42
Lannoitus	8.70	0.37	0.08	0.45
Niitto	3.02	0.40	0.07	0.47
Puinti	2.90	0.50	0.15	0.65
Ruiskutus	5.48	0.39	0.12	0.51
Tasausmuokkaus	4.60	0.44	0.02	0.46

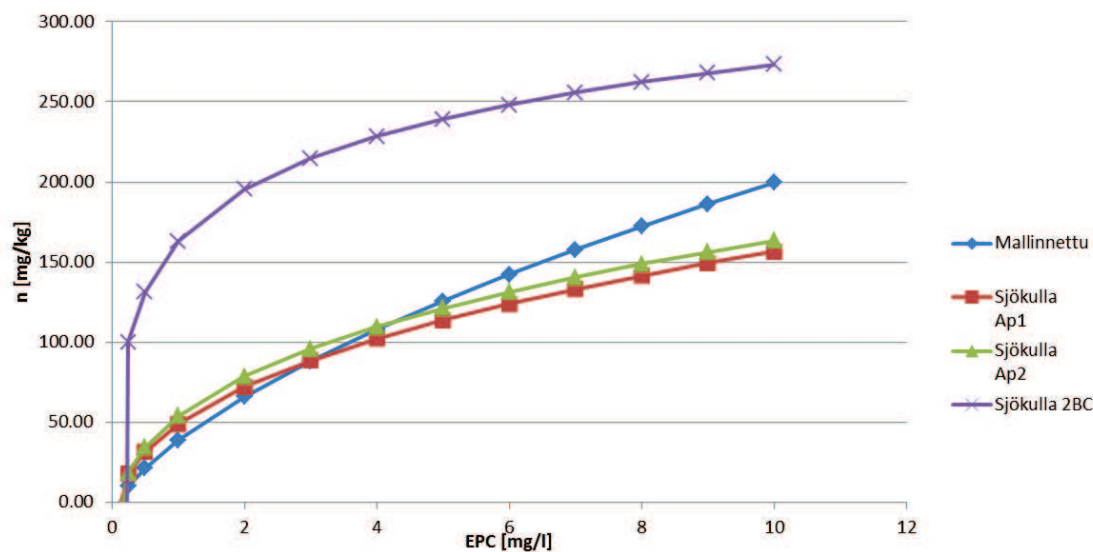
Liikkeelläolon ominaiskulutus vaihteli tehtävittäin 0.312 - 0.500 kg/km ollen suurimmillaan puinnissa ja kylvölannoituksessa ja pienimmillään kesannon murskauksessa, pintalannoituksessa ja ruiskutuksessa. Yhdistelmän paino selittää hyvin heikosti liikkeelläolon ominaiskulutuksen vaihtelua. Paikallaan olon osuus kokonaisominaiskulutuksesta vaihteli alueessa 3.5 % - 65 %.

## Huuhtoumamallien kehittäminen

INCA- mallit tuottivat samantasoiset ravinnepitoisuudet eri kuukausina kuin havaintopaikoilla oli mitattu (Kuva 31). Kesäkuussa oli mitattu korkeita typpipitoisuuksia, mahdollisesti johtuen lannoitteen joutumisesta näytteisiin. Näitä korkeita pitoisuuksia INCA-N malli ei toistanut. Myös mallinnettu fosforin tasapainokäyrä vastasi hyvin mitattua (kuva XX).



**Kuva 31.** Mitatut ja mallinnetut ravinnepitoisuudet eri kuukausina.



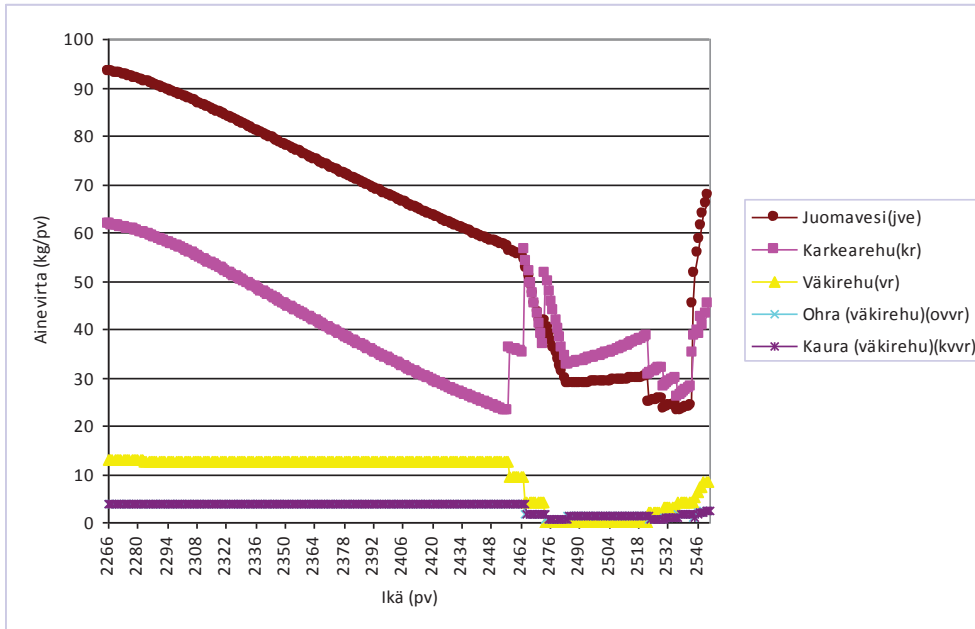
**Kuva 32.** INCA-P mallin fosforin tasapainokäyrä verrattuna Sjököllan koepelloilla mitattuihin.

Hovin keskimääräiset typpitaseet (lannoitus-sadon otto) olivat matalia, nurmen noin 0- -30 kg/ha ja ohra noin 10 kg/ha. Mallinnettu liukoisen typen kuormitus pelloilta on noin 6 kg/ha vuodessa. Fosforitaseet (lannoitus – sadon otto) olivat negatiivisia, ohran -1 kg/ha ja nurmen -10 kg/ha. Mallinnettu fosforikuormitus pelloilta oli keskimäärin 1.36 kg/ha vuodessa. Maan P-luku laski, mutta viljavuusluokka ei muuttunut.

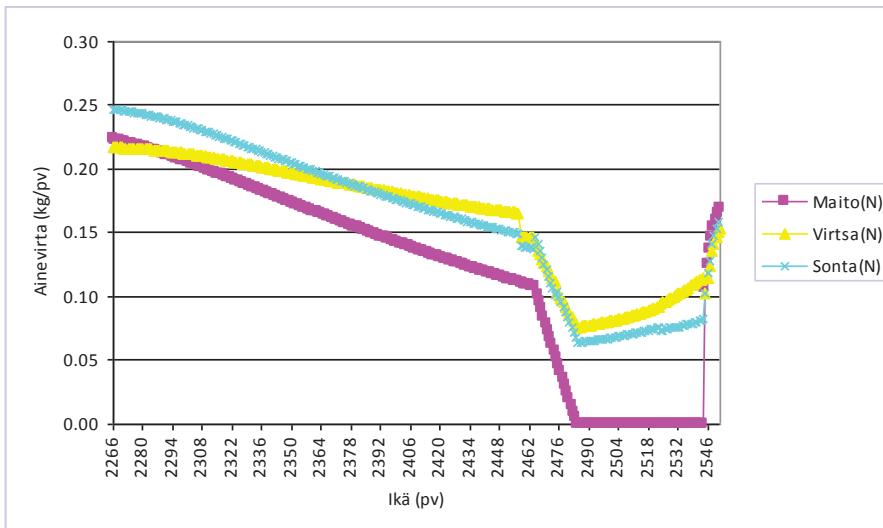
Kun oletettiin sadon jäävän puoleen havaitusta (katovuosi) niin typen kuormitus kasvoi 10 % mutta fosforikuormitus ei muuttunut. Ohralla maan P-luku nousi, sillä fosforitase muuttui positiiviseksi. Nurmen fosforitase pysyi edelleen lievästi negatiivisena, joten P-luku ei noussut.

## Karjamallin kehittäminen

Osatehtävän päätulos on mittauksiin perustuva karjan elinkaarimalli. Malli on adaptiivinen ja dynaaminen kuvaus lypsykarjan ainevirroista. Dynaamisuus on toteutettu päivän aika-askeleella etenevällä entalpia- ja ainevirtojen mallinnuksella, jossa otetaan huomioon eläimen perustoimintojen ja ruokinnan vaihtelut sen elinkaaren varrella. Esimerkkejä mallin tuottamista aikasarjoista nähdään kuvassa 33, joka esittää otteen eläimestä poistuvien typpivirtojen aikasarjoista laktatiokauden loppuvaiheilta, ja kuvassa 34, jossa on vastaavasti ote ulosvirtausten aikasarjoista.



**Kuva 33.** Esimerkki karjamallin tuottamista sisään virtausten aikasarjoista laktatiokauden loppupuolelta.



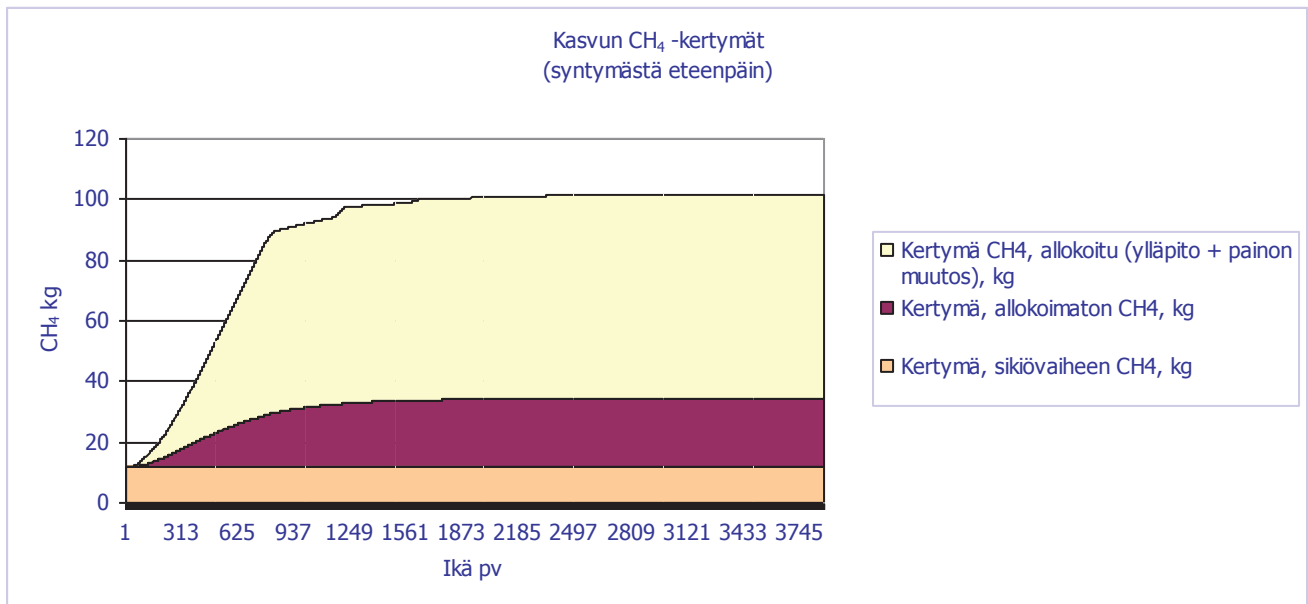
**Kuva 34.** Esimerkki karjamallin tuottamista ulos virtausten aikasarjoista laktatiokauden loppupuolelta.



## HierarchyNet -loppuraportti

Mallissa yhdistetään teoria- ja faktatietoja adaptiivisesti. Eläimen perustoimintoja kuvaavat relaatiot sovitetaan mitattuihin tila-, panos-, tuotos-, ja ylläpitosuureisiin, jota käytetään aina niin pitkälti kuin mahdollista.

Mallin on tarkoitettu viime perin palvelemaan lypsykarjatilojen ympäristötietojen tuotantoa. Siihen tehtävään se sopii ominaisuuksiltaan hyvin, koska se pystytään tiiviisti sovittamaan jokaisen tilan jokaiselle eläimelle erikseen. Tilan karjan ainevirroista saadaan mallilla muodostetuksi kuva, joka on sitä lähempänä todellisuutta mitä enemmän mittaustietoja on käytettävissä mallin kalibrointiin.

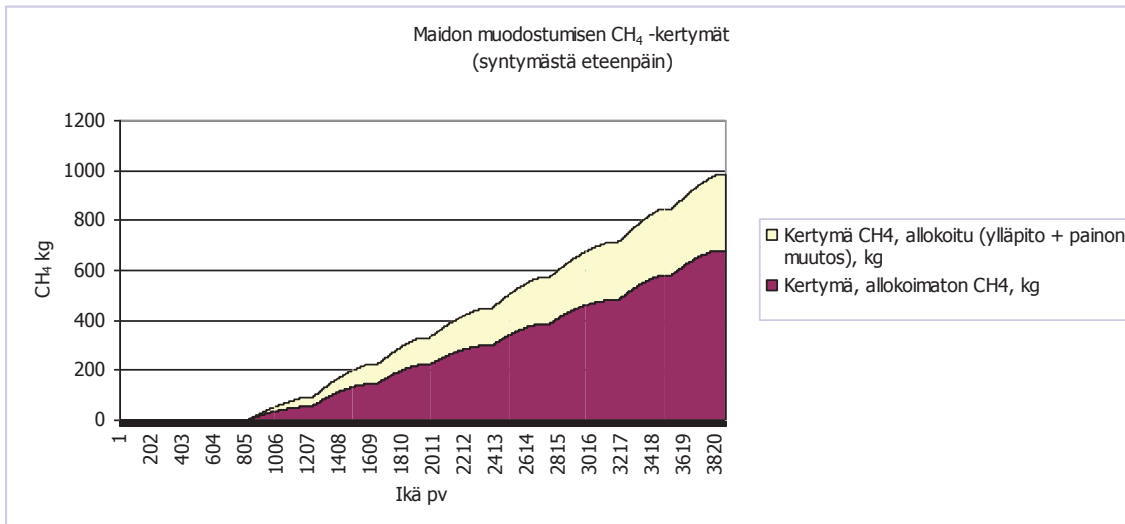


**Kuva 35.** Karjamallilla laskettu esimerkki kasvun CH<sub>4</sub> päästön kertymästä (kg) lypsylehmän elinkaaressa.

Ainevirtatuloksia voidaan hyödyntää tilan ympäristövastuun viestinnässä tuotteita ostaville asiakkaille ja sitä kautta aina loppukuluttajille saakka. Esimerkiksi myytävien eläinten ja raakamaidon metaanin päästöjen kertymät ovat suoraan viestinnässä hyödynnettäviä mallin tuloksia. Näistä on esimerkit kuvissa 35 ja 36. Kuvissa on entalpian käytöstä johtuvat suorat ja allokaatiossa tulleet epäsuorat metaanipäästöt.

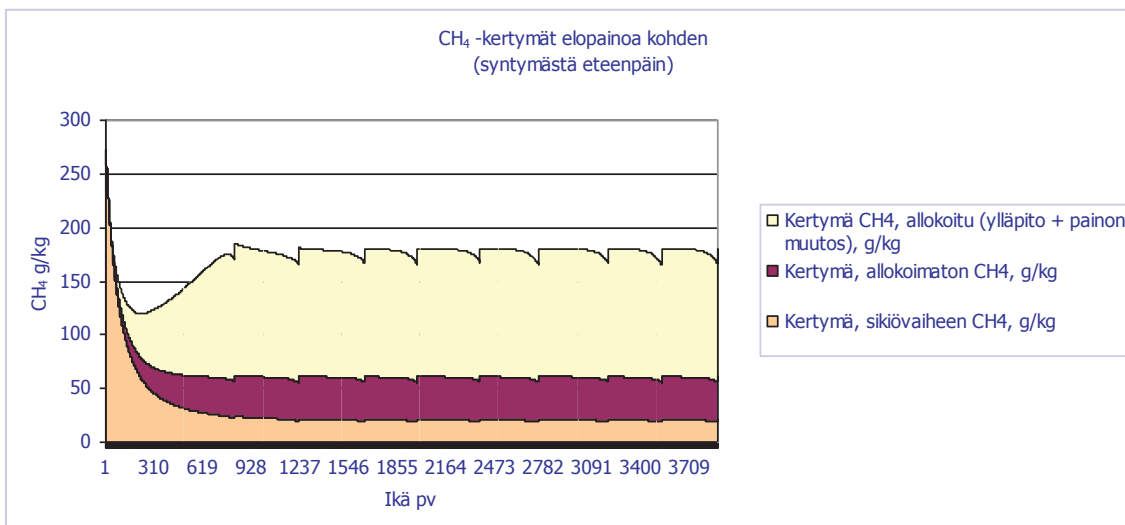
Kuvassa 35 nähdään lypsylehmän, Maaningan Heilan, kasvulle kertynyt CH<sub>4</sub> -päästö elinkaaren aikajanalla. Ajankohdan kertymä on se kokonaispäästö määrä, jonka Heila olisi vienyt mukanaan poistuessaan tilalta tuona ajankohtana. Kuvassa alimpana näkyvä osuus on sikiövaiheesta emon kautta kertynyt päästö. Kuvassa näkyvien, kaikkiaan noin yhdeksän laktaatiokauden jälkeen Heilan kasvusta oli aiheutunut noin 100 kg metaanipäästöjä eli noin 11 kg/kausi.

Kuva 36 esittää Heilan maidolle kertyneen CH<sub>4</sub> -päästön elinkaaren aikajanalla. Ajankohdan kertymä on se kokonaispäästö määrä, jonka Heilan maito oli yhteensä vienyt mukanaan tuohon ajankohtaan mennessä. Kahden ajankohdan kertymien erotus on näiden ajankohtien välisellä ajanjaksolla, esimerkiksi yhtenä vuonna, Heilan tuottaman maidon aiheuttama metaanipäästö. Yhdeksän laktaatiokauden aikana Heilan maidon tuotannosta aiheutui yhteensä hieman vajaa 1000 kg metaanipäästöjä eli noin 109 kg/kausi. Kaikkiaan Heilan metaboliassa syntyi metaanipäästöjä keskimäärin 120 kg laktaatiokausi.



**Kuva 36.** Karjamallilla laskettu esimerkki maidon muodostuksen  $CH_4$  -päästön kertymästä (kg) lypsylehmän elinkaareessa.

Mallilla voidaan tarkastella myös tuotannon ekotehokkuuden kehitystä eläimen elinkaareessa. Tästä on esimerkit kuvissa 37 ja 38. Kuvassa 37 nähdään mallilla laskettu, Heilan kasvun ekotehokkuutta ilmastomuutoksen suhteen kuvaava aikasarja. Indikaattorina toimii tässä sarjassa  $CH_4$  -päästön kertymän suhde elopainoon eli metaanin ominaispäästökerroin.



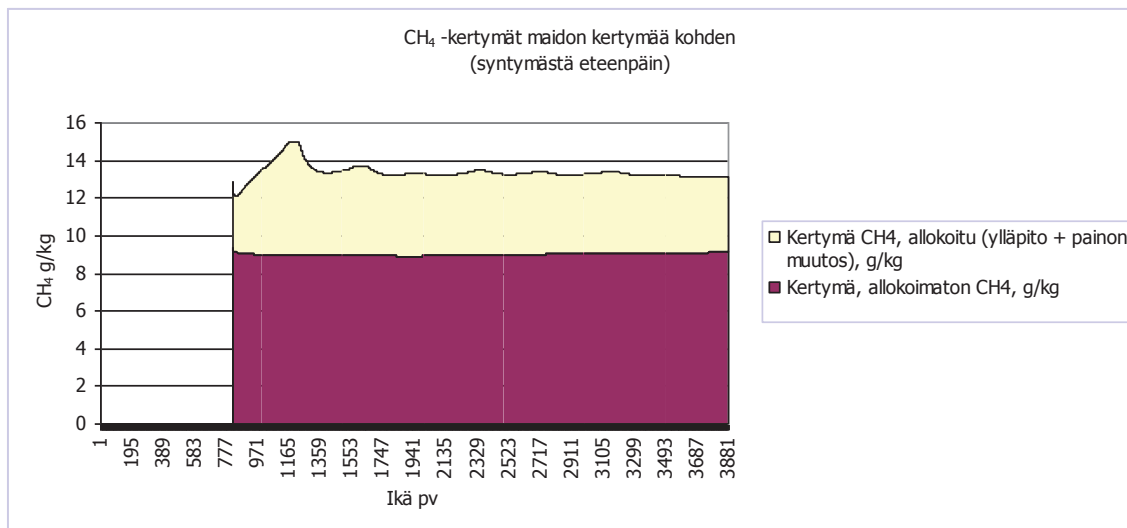
**Kuva 37.** Karjamallilla laskettu esimerkki kasvun  $CH_4$  -päästön kertymästä elopainoa kohden (kg/kg) lypsylehmän elinkaareessa.

Sarja lähtee liikkeelle melko suuresta arvosta, mikä ilmentää sitä, että sikiön kehittyminen on ekotehokkuudeltaan yksilön kasvun heikoin vaihe. Tämä on loogista, ja yleistä kaikilla nisäkkäillä, koska sikiön kasvussa on kaksi peräkkäistä entalpiian muuntoa, emän primaarimetabolialla ja sikiön sekundaarimetabolialla, joissa kummassakin aiheutuu muuntohäviöitä. Heila ei siis ole tässä suhteessa poikkeus.

## HierarchyNet -loppuraportti

Syntymän jälkeisessä kasvussa hyötysuhde on noin nelinkertainen sikiön kehittymiseen verrattuna, ja ekotehokkuus paranee aluksi nopeasti. Ylläpidosta allokoinnilla siirrettävä päästöerä alkaa kuitenkin uudelleen heikentää ekotehokkuutta, kunnes se kasvun loputtua, noin ensimmäisen laktaatiokauden lopulla, asettuu vakiotasolle. Tämän stationäärivaiheen ekotehokkuuden taso on lypsylehmistä saatavan lihan ekotehokkuuden kannalta merkittävä kannalta merkittävä, koska se on lopullinen taso, joka seuraa eläintä hyödyntämiseen, jossa siihen ei enää voida vaikuttaa. Lypsylehmästä saadaan teurastuksessa lihaa suhteellisen vähän vaihteleva osuus, noin 48 %. Nuorilla eläimillä ekotehokkuus on suurimmillaan 100 – 470 päivän iässä.

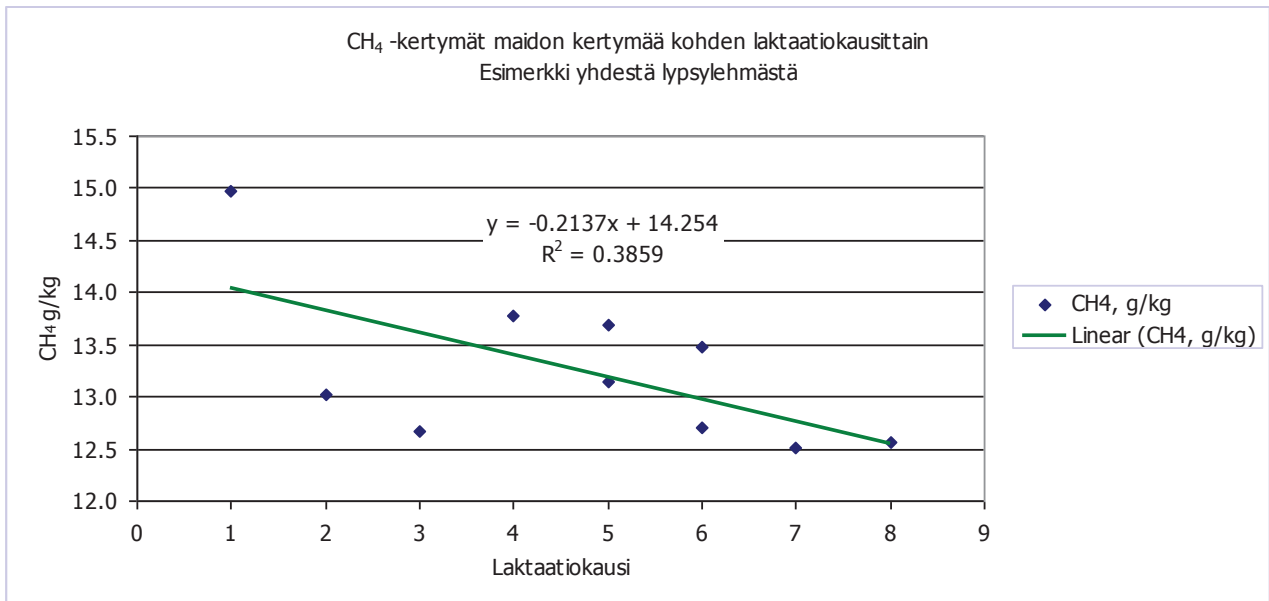
Kuvassa 38 tarkastellaan sitä, miten Heilan maidon muodostumisen ekotehokkuus muuttui elinkaaren varrella. Indikaattorina tässäkin on metaanin ominaispäästökerroin, tällä kertaa laskettuna  $\text{CH}_4$  -päästön kertymän suhteena maidon kertymään. Sarja on suhteellisen tasainen alusta lähtien. Alussa ilmenee jonkin verran heilahtelua, joka kuitenkin lakkaa noin kolmannesta laktaatiokaudesta alkaen. Ominaispäästökertoimen trendi on hienokseltaan laskeva, toisin sanoen ekotehokkuus kasvaa vastaavasti ajan kuluessa.



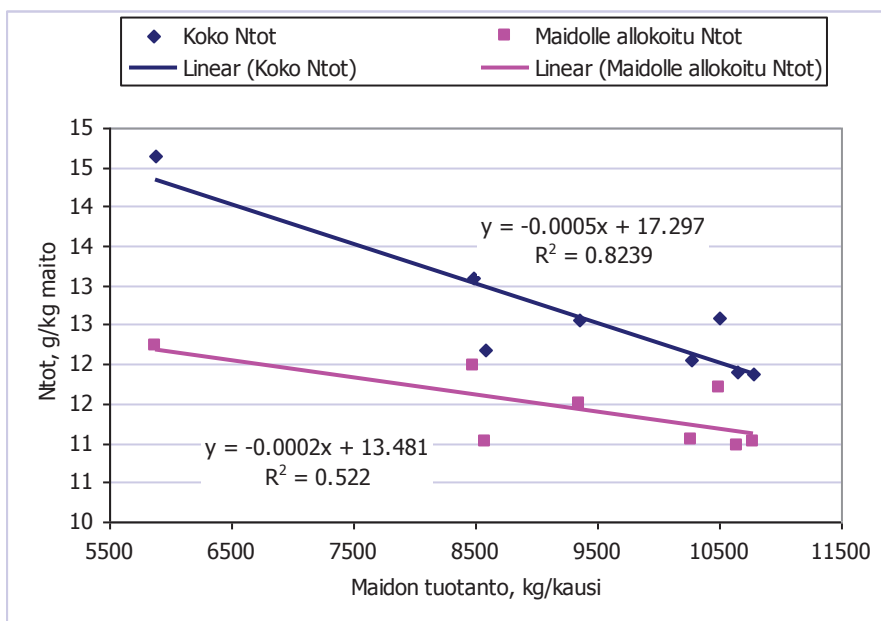
**Kuva 38.** Karjamallilla laskettu esimerkki maidon muodostuksen  $\text{CH}_4$  -päästön kertymästä raaka maidon kertymää kohden (kg/kg) lypsylehmän elinkaaressa.

Trendi ilmenee vahvemmin kuvasta 39, jossa esitetään Heilan laktaatiokausittain laskettuja metaanin ominaispäästökertoimia. Heilan tapauksessa maidon tuotannon ekotehokkuus  $\text{CH}_4$  - ominaispäästökertoimella mitattuna näyttäisi siis paranevan iän myötä. Selitysaste trendille on kuitenkin pieni. Esimerkkiä ei olekaan tarkoitettu yleistettäväksi, vaan se kuvaa vain vielä yhtä näkökulmaa, miten mallin tuloksia hyödyntäen voidaan ekotehokkuuden kehittymistä analysoida eläinkohtaisesti.

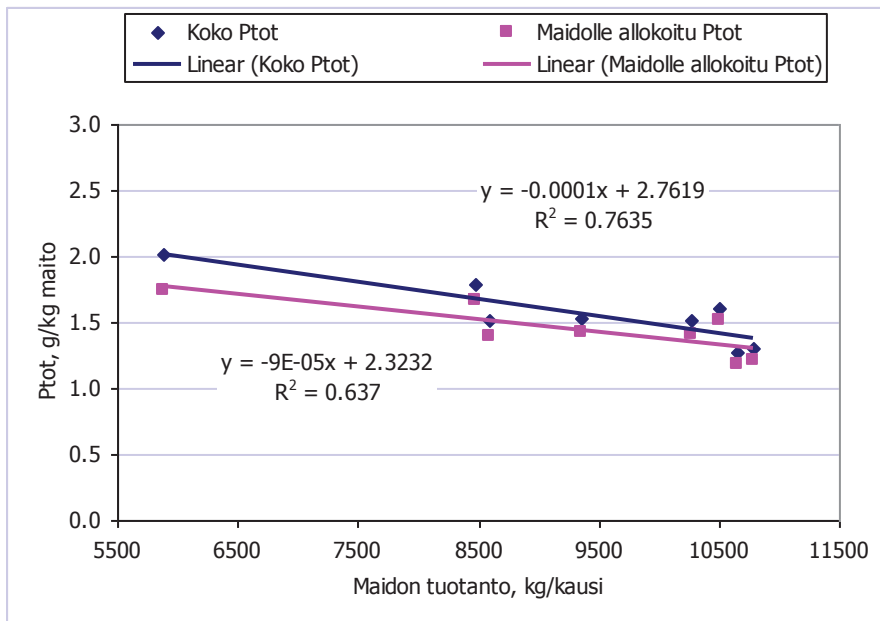
Mallilla voidaan analysoida myös tuotostason vaikutusta ekotehokkuuteen. Esimerkkeinä nähdään kuvassa X esitetty lannan typen ja kuvassa Y esitetty fosforin ominaiskertoimen ja tuotostason yhteys Heilan elinkaaressa. Tuotostason selitysaste on kummassakin tapauksessa kokonaismäärän tapauksessa vahva.



**Kuva 39.** Karjamallilla laskettu esimerkki maidon muodostuksen CH<sub>4</sub> -päästön kertymästä raaka maidon kertymää kohden (kg/kg) laktaatiokausittain erään lypsylehmän elinkaaressa.



**Kuva 40.** Karjamallilla laskettu esimerkki lannan kokonaistypen ja maidolle allokoitun typen ominaiskertoimien (g/kg maito) yhteyksistä laktaatiokauden maitotuotokseen erään lypsylehmän elinkaaressa.



**Kuva 41.** Karjamallilla laskettu esimerkki lannan kokonaisfosforin ja maidolle allokoitun fosforin ominaiskertoimien (g/kg maito) yhteyksistä laktaatiokauden maitotuotokseen erään lypsylehmän elinkaareessa.

Täydellisempää ja erityisesti ulospäin suuntautuvaa tuoteviestintää varten karjamalli laajennetaan tuotteen elinkaarimalliksi, johon silloin kuuluu rehun hankintaketjujen mallit sekä omalla tilalla että tilan ulkopuolella, rehuteollisuudesta tuleville rehuille. Alavirran suunnassa karjamalliin liitetään lantalogistiikan ketjut ja itse karjaan tuotantofasilitteettien mallit liittyvine panosketjuineen. Lisäksi eläinmalliin yhdistetään fasilitteettien (eläinsuoja, valaistus-, lämmitys-, ruokinta-, lypsy- varastointi- jne. järjestelmien mallit) ja utiliteettien (vesi, kuivikkeet, jne.) mallit, joilla kuvataan karjanhoitoprosessi kokonaisuutena. Tämä mallinnustaso ei kuitenkaan kuulunut tämän hankkeen tehtäviin.

Karjamallin toimivuus on testattu käytännössä. Se on kuitenkin vasta prototyyppiasteella ja edellyttä vielä jatkokehitystä ollakseen siirrettävissä tuotantokäyttöön. Tässä annettu yksityiskohtainen systeemikuvaus mallista on tarkoitettu jatkotyön lähtökoaineistoksi. Jatkokehittämistä tarvittaisiin erityisesti lypsykarjatilanteiden teknisten järjestelmien keräämien mittaustietojen hyödyntämisen mahdollistavien liityntäteknologioiden ja ohjelmistojen aikaansaamiseksi.

## **6. Johtopäätökset**

HierarchyNet-hankkeessa on yhteistyössä Cropinfra-hankkeen kanssa kehitetty mittauksiin perustuva malli kasvintuotannon eri työvaiheiden todellisen polttoaineen kulutuksen ja tuotantopanosten käytön siirtämiseksi tilan omiin elinkaarimalleihin. Mallilla tuotettujen tietojen varaan voidaan rakentaa tilan tuotantolinjojen elinkaarimalleja, joilla tilan tuottamille tuotteille saadaan lasketuksi kokonaisympäristövaikutukset ”kehdestä portille” eli luonnon raaka-aineista valmiiksi myyntiin toimitettaviksi tai omaan käyttöön tarkoitetuiksi tuotteiksi. Mallin antamien tulosten perusteella viljelijä voi parantaa ympäristökuormituksen vähentämiseen tähtääviä toimintatapoja, taloudellisen tuloksen samalla parantuessa ja työn laadun kärsimättä.

Peltotyökoneiden ja viljan kuivurin polttoaineiden kulutukset sekä kuivurin sähköenergian kulutus pystytään mittaamaan tarkasti ja mittaustieto hyödyntämään tuotannon elinkaarimalleissa. Tiedonhallintajärjestelmän toiminta on nyt teknisesti kohtuullisen luotettava, mutta käyttäjä-kone-liitynnässä ja tietologiikassa kentältä mallinnusjärjestelmän tietokantaan on vielä parannettavaa. Hankkeen aikana mallin toimintavarmuus on saatu lähelle tuotantokäytössä vaadittavaa tasoa, vaikkakin sen käyttö on silti vielä melko hankalaa ja aikaa vievää. Suurimmat ongelmat muodostuvat perusprosessidatojen keräämisestä, käyttäjä-kone-liitynnässä ja tietologiikassa kentältä mallinnusjärjestelmän tietokantaan. Tällä hetkellä maatiloilla on käytössä sekä vanhaa että uutta tekniikka ja teknologiaa. Uusien työkoneiden, traktorien ja puimurien automaatiojärjestelmät mahdollistavat tarvittaessa paikkakohtaisten tietojen keruun. Ongelmaksi muodostuu vanhojen, prosessidatan keruuta eri tuotannon vaiheista tukemattomien järjestelmien käyttäminen.

Tulevaisuudessa laite- ja tietotekniikan kehittyminen tulee helpottamaan viljelijän työtä ja tiedon dokumentointi tuleekin yhä automaattisemmaksi. Yksi maatalousteknologian tärkeimmistä kehittämiskohteista on mittaus- ja tunnistetiedon automaattisen generoinnin lisääminen ja tiedon siirtämisen automatisointi keruupisteestä tietokantaan. Datan ja tiedon kahdensuuntainen siirto peltoprosessien, maatilan ja eri palveluiden välillä luo uusia liiketoimintamahdollisuuksia maataloussektorille. Yhtenä mielenkiintoisena tutkimuskohteena onkin pilvipalveluiden kehittäminen ja Tulevaisuuden Internet-teknologioiden hyödyntäminen maatalouden liiketoimintaekosysteemeissä.

Hankkeessa tutkittiin valuma-alueen typpi- ja fosforiravinnevirtojen mallinnuksessa käytettyjen INCA-N ja INCA-P -mallien soveltamista lohkolta huuhtoutuvien ravinnevirtojen laskentaan. Mallit onnistuttiin kalibroimaan tutkimuslohkolle sieltä tehtyjen valumamittausaikaasarjojen ja viljelykirjanpidosta muodostetun viljelyhistorian avulla. Kalibrointi osoittautui melko haasteelliseksi, koska automaattisia menetelmiä sen suorittamiseen ei vielä ainakaan toistaiseksi ole olemassa. Haastetta kasvatti mallien viljelyhistorialta, maaperän ominaisuuksilta ja paikallisilta säätiedoilta edellyttämä yksityiskohtaisuuden korkea taso.

Kalibroittujen mallien koeajotuloksista havaittiin, että ne kohtuullisesti seuraavat mitattuja ravinnepitoisuuksia ja niiden vuodenaikavaihteluita. Mallien ennustamat virtaamat ja niiden pitoisuustrendit eivät usein osuneet yksin havaittujen virtaamien ja näiden ravinnepitoisuustrendeihin. Pitemmän ajanjakson kokonaisvirtaamissa ja keskipitoisuuksissa mallien antamat estimaatit olivat kuitenkin samaa luokkaa kuin mitä mitatuista virtaamista ja pitoisuuksista laskien tuli. Huuhtoumien mallinnuksessa tavoite on arvioida luotettavasti juuri pitemmän aikavälin, eli viljelyvuoden kokonaishuuhtoumat. INCA mallit voivat saatujen tulosten perusteella auttaa tämän tavoitteen saavuttamisessa. Mutkia matkalla mallien hyödyntämiseen tuotantokäytössä on vielä kuitenkin paljon. Suurimpia ratkaistavia ongelmia on niiden kiinnittyminen selkeästi erottuviin valuma-alueisiin, mitä peltolohkot yleisesti ottaen eivät usein ole.

Tilan toimintaan sovitettavasta karjan elinkaarimallista kehitettiin hankkeessa prototyyppi ja sen toimivuus testattiin käytännössä. Pilotointi osoitti mallin toimivan luotettavasti. Malli on kehitetty

## *HierarchyNet -loppuraportti*

lypsykarjalle, mutta menetelmällisesti se sopii myös lihakarjalle. Mallin yleisperiaate soveltuu myös sikojen ja siipikarjan tuotannon mallintamiseen.

Mallissa yhdistetään teoria- ja faktatietoja adaptiivisesti. Eläimen perustoimintoja kuvaavat relaatiot sovitetaan mitattuihin tila-, panos-, tuotos-, ja ylläpitosuureisiin, jota käytetään aina niin pitkälti kuin mahdollista. Mallin on tarkoitettu palvelemaan lypsykarjatilojen ympäristötietojen tuotantoa. Siihen tehtävään se sopii ominaisuuksiltaan hyvin, koska se pystytään tiiviisti sovittamaan jokaisen tilan jokaiselle eläimelle erikseen. Tilan karjan ainevirroista saadaan mallilla muodostetuksi kuva, joka on sitä lähempänä todellisuutta mitä enemmän mittaustietoja on käytettävissä mallin kalibrointiin.

Karjamalli olisi periaatteessa mahdollista ottaa heti käyttöön yksittäisillä lypsykarjatoilla. Malli on kuitenkin vasta prototyyppiasteella ja vaatii vielä jatkokehitystä, jotta sillä voisi toimia tuotantoelämässä vaaditulla tehokkuudella. Suurimpia haasteita mallin jatkokehittämiselle on sen ohjelmoiminen tietokantaympäristöön ja teknisten järjestelmien keräämien mittaustietojen siirtämiseen tarvittavien uusien teknologioiden kehittäminen, jotta niiden keräämät tiedot saataisiin vaivattomasti mallin hyödynnettäväksi. Kehittämisvisio on, että malli tulee tuottajien käyttöön verkkopalveluna, johon tuottajien tiedot kerätään ja josta näistä luodot elinkaaritiedot ja tuotannon analyysit virtaavat takaisin tuottajan hyödynnettäväksi.

## **7. Loppuraportin tiivistelmä**

Tässä hankkeessa kehitettiin konkreettisen kvantitatiivisen ympäristötiedon tuottamiseen tarkoitettuja tiedonhallinnan malleja tilatasolle. Kohteena oli kasvintuotannon prosessien panosten ja tuotosten seurantaan eri tasoilla käytettävä malli, peltolohkojen ravinnehuuhtoumien arviointimallit ja mittaustietoihin nojaava lypsykarjan malli. Hankkeen tulokset on suunnattu viljelijöille ja eläintuottajille, joiden ympäristötietojen hallintaa uusilla malleilla parannetaan, sekä jatkokehitystä tekevät ja mallia tutkimuskäyttöön soveltavat tutkijat, joiden panosta vielä tarvitaan mallien viemisessä tuotantoasteelle

Hankkeen toteuttivat yhteistyössä MTT:n kasvitutkimuksen (MTT/KTL, materiaaaliveiktatietojen keruujärjestelmät), taloustutkimuksen (MTT/TAL, kirjanpitolajärjestelmä) ja biotekniikan ja elintarviketutkimuksen (MTT/BEL, systeemimallinnus) tutkijat.

Mallit ovat rakenteeltaan hierarkkisia. Niiden alin taso kiinnittyy todellisuuteen mittaustietojen kautta. Mallinnuksessa käytetty päämenetelmä on relaatiomallinnus (engl. Entity-relationship modelling ERM) sovellettuna elinkaarimallinnukseen. Hierarkiatasojen väliset liittynät ovat relaatiomalleja, jotka kuvaavat ylemmän tason objektien, muodostumisen alemman tason objekteista. Mallia käytetään tilalla tuotettujen tuotteiden ympäristö- ja jäljitettävyystietojen hallintaan sekä tuotteiden elinkaaristen ympäristövaikutusten laskentaan.

Kasvintuotannon mallilla eri työvaiheiden todelliset polttoaineen kulutukset ja tuotantopanosten käytöt siirretään tilan omiin elinkaarimalleihin. Mallilla tuotettujen tietojen varaan voidaan rakentaa tilan tuotantolinjojen elinkaarimalleja, joilla tilan tuottamille tuotteille saadaan lasketuksi kokonaisympäristövaikutukset ”kehdosta portille” eli luonnon raaka-aineista valmiiksi myyntiin toimitettaviksi tai omaan käyttöön tarkoitetuiksi tuotteiksi. Mallin antamien tulosten perusteella viljelijä voi parantaa ympäristökuormituksen vähentämiseen tähtääviä toimintatapoja, taloudellisen tuloksen samalla parantuessa ja työn laadun kärsimättä.

Karjamallilla, joka muodostuu eläinyksilöiden malleista, viedään todelliset tuotantopanokset kasvu- ja maitotuokset lypsykarjatilalla omiin lihan ja maidon elinkaarimalleihin. Yhdistämällä ulkoisten panosketjujen malleihin karjamalli voidaan laajentaa tilan tuotteiden elinkaarimalleja, joilla lasketaan kokonaisympäristövaikutukset ”kehdosta portille” samaan tapaan kuin hankkeessa tuotetuilla kasvintuotannon malleillakin. Karjamallin tulosten avulla tuottaja voi seurata ja parantaa tuotantonsa ekotehokkuutta.

Ravinnehuuhtoumien mallien kehitys tuotti lupaavia tuloksia isojen valuma-alueiden mallintamiseen tarkoitettujen INCA-N ja INCA-P mallien sovellettavuudesta lohkomittakaavaan. Koelohkolle kalibroituja valuma-aluemallien ajotuloksista havaittiin, että ne seuraavat kohtuullisen hyvin mitattuja ravinnepitoisuuksia ja niiden vuodenaikavaihteluita. Pitemmän ajanjakson kokonaisvirtaamisissa ja keskipitoisuuksissa mallien antamat estimaatit olivat samaa luokkaa kuin mitä mitatuista virtaamista ja pitoisuuksista laskien tuli. INCA mallit ovat saatujen tulosten perusteella potentiaalisia työkaluja tilatason huuhtoumien mallinnukseen. Matkaa mahdolliseen tuotantokäyttöön vielä kuitenkin on. Suurimpia ratkaistavia ongelmia on mallien kiinnittyminen selkeästi erottuviin valuma-alueisiin, mitä peltolohkot yleisesti ottaen eivät usein ole.

Hanke onnistui tavoitteittensa saavuttamisessa. Hankkeen keskeisimpänä hyötynä voi pitää sitä, että kehitetyillä malleilla on mahdollista ottaa haltuun prosessien hajonnat, joka tähänastisilla elinkaarimallinnusmenetelmiltä jää käytännössä tekemättä. Niiden avulla voidaan vastata esimerkiksi kysymykseen, mikä on tietyn tuotantoerän tai maatilan hiilijalanjälki. Voidaan myös saada selville se, miten pieneksi hiilijalanjälki voidaan saada tietyillä peltolohkoilla tai tietyssä eläinryhmässä toimintatapoja muuttamalla. Mallien toiminta on todennettu pilotoinneilla ja periaatteessa ne voitaisiin ottaa tiloilla heti käyttöön. Ne ovat kuitenkin vasta prototyyppisiä ja tästä johtuen niillä työskentely on



### *HierarchyNet -loppuraportti*

vielä liian hankalaa ja aikaa vievää. Laite- ja tietotekniikan jatkokehittäminen tulee helpottamaan viljelijän työtä tulevaisuudessa uusien sovellusten myötä. Tällöin yksittäisille viljelijöille tulee mahdolliseksi ottaa mallit kannattavasti tuotantokäyttöön esimerkiksi verkkoon perustettujen palveluiden kautta.

## **Viitteet**

1. Virtanen, Y., Hyvärinen, H., Katajajuuri, J.-M., Kurppa, S., Nousiainen, J., Saarinen, M., Sinkko, T., Usva, K., Virtanen, J. & Voutilainen, P., Ekholm, P., Grönroos, J., Koskela, S. & Väänänen, S., Mäenpää, I. 2009. Elintarvikeketjun ympäristövastuun taustaraportti (2009). Saatavilla osoitteesta: [http://www.portaatluomuun.fi/resources/public/Ketjuvastuu\\_kokonaisuus\\_15\\_12\\_2009.pdf](http://www.portaatluomuun.fi/resources/public/Ketjuvastuu_kokonaisuus_15_12_2009.pdf)
2. Pesonen, L., Teye, F., Ronkainen, A., Koistinen, M., Kaivosoja, J., Suomi, P., Linkolehto, R. 2013. Cropinfra : An internet-based Service Infrastructure to support Crop Production in future Farms. Biosystems Engineering: 10 p.
3. LIPASTO -laskentajärjestelmä, VTT. Työkoneiden keskimääräinen päästö polttoainelitraa kohden Suomessa vuonna 2011. Saatavilla osoitteesta: [http://www.lipasto.vtt.fi/yksikkopaastot/muut/tyokoneet/diesel\\_a\\_t.htm](http://www.lipasto.vtt.fi/yksikkopaastot/muut/tyokoneet/diesel_a_t.htm).
4. Tilastokeskus 2011. Polttoaineluokitus 2011. Saatavilla osoitteesta: [http://www.stat.fi/tup/khkinv/khkaasut\\_polttoaineluokitus\\_edelliset.html](http://www.stat.fi/tup/khkinv/khkaasut_polttoaineluokitus_edelliset.html)
5. IPCC 2007. 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Volume 2. Energy. Stationary Combustion.
6. Pöyry Management Consulting Oy 2010. Öljyalan Palvelukeskus Oy. Laskelma lämmityksen päästöistä.
7. Grönroos, J., Mattila, P., Regina, K., Nousiainen, J., Perälä, P., Saarinen, K. ja Mikkola-Pusa, J. 2009. Development of the ammonia emission inventory in Finland Revised model for agriculture. The Finnish environment 8, 2009. Finnish Environment Institute.
8. Viljavuuspalvelu Oy 2014. Lantatilasto 2006–2009, Viljavuuspalvelu Oy. Saatavilla osoitteesta: <http://www.viljavuuspalvelu.fi/fi/tilastot>
9. Tilastokeskus 2013. Greenhouse Gas Emissions in Finland 1990-2011. National Inventory Report under the UNFCCC and the Kyoto Protocol. 15 april 2013.
10. IPCC 2011. 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Volume 4. Agriculture, Forestry and Other Land Use. N2O Emissions from Managed Soils, and CO2 Emissions from Lime and Urea Application.
11. Brandão M, et al., Soil organic carbon changes in the cultivation of energy crops: Implications for GHG balances and soil quality for use in LCA, Biomass and Bioenergy (2010), doi:10.1016/j.biombioe.2009.10.019
12. Bird, N., Cowie, A., Cherubini, F. ja Jungmeier, G. 2011. Using a Life Cycle Assessment Approach to Estimate the Net Greenhouse Gas Emissions of Bioenergy. IEA Bioenergy:ExCo:2011:03
13. Tuomi, M., Thum, T., Järvinen, H., Fronzek, S., Berg, B., Harmon, M., Trofymow, J.A., Sevanto, S., Liski, J., 2009. Leaf litter decomposition — estimates of global variability based on Yasso07 model. Ecological Modelling 220, 3362–3371.
14. Coleman, K. ja Jenkinson, D. 1999. ROTHC-26.3. A Model for the Turnover of Carbon in Soil. Model Description and Windows Users Guide. IACR - Rothamsted.
15. Richards, G., Evans, D., Reddin, A. ja Leitch, J. 2005. The FullCAM carbon accounting model (version 3.0) user manual. Australian Greenhouse Office. Saatavilla osoitteesta: <http://pandora.nla.gov.au/pan/102841/20090728-0000/www.climatechange.gov.au/ncas/reports/pubs/fullcam-usermanual.pdf>
16. Saarinen, M., Kurppa, S., Nissinen, A., Mäkelä, J. (toim.) 2011. Aterioiden ja asumisen valinnat kulutuksen ympäristövaikutusten ytimessä. ConsEnv-hankkeen loppuraportti. SUOMEN YMPÄRISTÖ 14 / 2011. Suomen ympäristökeskus. Saatavilla osoitteesta: <https://helda.helsinki.fi/handle/10138/37037>.
17. AFRC 1993. Energy and Protein Requirements of Ruminants. An advisory manual prepared by the AFRC Technical Committee on Responses to Nutrients. CAB International, Wallingford, UK.
18. Perotto, D., Cue, R. L and Lee, A. J. 1992. Comparison of nonlinear functions for describing the growth curves of three genotypes of dairy cattle. Can. J. Anim. Sci. 72: 773-782.
19. Nousiainen, J. 2013 Henkilökohtainen tiedonanto.
20. S. Korver, J. A. M. van Arendonk and W. J. Koops (1985). A function for live-weight change between two calvings in dairy cattle. Animal Production, 40, pp 233-241. doi:10.1017/S0003356100025332.
21. De Vries, A. 2001. Statistical process control charts applied to dairy herd reproduction. Thesis.
22. Martin, O. ja Sauvant, D. 2007. Dynamic model of the lactating dairy cow metabolism. Animal (2007), 1:8, pp 1143–1166 & The Animal Consortium 2007.
23. NRC 2001. Nutrient Requirements of Dairy Cattle: Seventh Revised Edition, 2001 Subcommittee on Dairy Cattle Nutrition, Committee on Animal Nutrition, National Research Council.
24. Block, H. C., Erickson, G. E. ja Klopfenstein, T. J. 2004. Review: Re-Evaluation Of Phosphorus Requirements And Phosphorus Retention Of Feedlot Cattle. The Professional Animal Scientist 20 (2004):319–329.

25. Z. Wu, L. D. Satter, A. J. Blohowiak, R. H. Stauffacher, and J. H. Wilson 2001. Milk Production, Estimated Phosphorus Excretion, and Bone Characteristics of Dairy Cows Fed Different Amounts of Phosphorus for Two or Three Years. *Journal of Dairy Science* Vol. 84, No. 7, 2001.
26. NIST Chemistry WebBook 2014. National Institute of Standards and Technology. Saatavilla: <http://webbook.nist.gov/chemistry/>
27. Khelil-Arfa, H., Boudon, A., Maxin, G. and Faverdin, P. 2012. 'Prediction of water intake and excretion flows in Holstein dairy cows under thermoneutral conditions. *Animal*, pp. 1 - 15. The Animal Consortium 2012.
28. Whitehead, P., Wilson, E., ja Butterfield, D. 1998. A semi-distributed Integrated Nitrogen Model for multiple Source Assessment in Catchments (INCA): Part I model Structure and Process Equations *The Science of the Total Environment* 210/211 (1998) 547-558 Elsevier Science B.V.
29. Wade, A., Durand, P., Beaujoan, V., Wessels, W., Raat, K., Whitehead, P.G., Butterfield, D., Rankinen, K., Lepistö, A., 2002. Towards a generic nitrogen model of European ecosystems: new model structure and equations. *Hydrology and Earth System Sciences* 6 (3), 559-582.
30. Whitehead, P.G., Wilson, E.J., Butterfield, D., 1998. A semi-distributed Integrated Nitrogen model for multiple source assessment in Catchments (INCA): part I- model structure and process equations. *The Science of the Total Environment* 210/ 211, 547-558.
31. Wade, A., Whitehead, P. ja Butterfield, D. 2002. The Integrated Catchments Model of Phosphorus Dynamics (INCA-P), a new Approach for Multiple Source Assessment in heterogeneous River Systems: Model structure and Equations *Hydrology and Earth System Sciences*, 6(3). 583—606 (2002) © EGS.